

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra mechanické technologie

Optimalizace části výrobního procesu

Optimization of Part Production Process

Student: Bc. Martin Andrášek  
Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Josef Novák, CSc.

Ostrava 2014

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Andrýsek**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **2303T002 Strojírenská technologie**  
Specializace: **10 Technologický management**  
Téma: **Optimalizace části výrobního procesu**  
**Optimization of Part Production Process**

Zásady pro vypracování:

1. Analýza aktuálního stavu
2. Posouzení aktuálního stavu
3. Analýza jednotlivých procesů a činností
4. Návrh řešení
5. Celkové zhodnocení práce

Seznam doporučené odborné literatury:

NOVÁK, J. *Organizace a řízení*. VŠB-TU Ostrava, 2006. 105 s. ISBN 80-248-1223-1.  
NOVÁK, J. *Racionalizace výroby*. Ostrava: FS, Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava, 2007.  
URL: <http://www.fs.vsb.cz/europrojekty/414/racionalizace-vyroby.pdf>  
NOVÁK, J. *Datová základna pro údržbu, montáže a další pomocné a obslužné práce: soubor základních technologických postupů*. Ostrava, 2004. 266s.  
HELEBRANT, F. *Konstrukce velkostatků a jejich spolehlivost. II. Díl. Provozní spolehlivost*. Montanex, 2004. 89 s. ISBN 82-7225-149-X.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Josef Novák, CSc.**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014



  
Ing. Petr Mohyla, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 3.5.2014

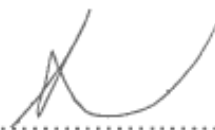
  
.....

Martin Andrysek

**Prohlašuji, že:**

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 - školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé diplomové práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB - TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnou licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 3.5.2014



.....

Martin Andrysek

Jméno a příjmení autora práce:  
Adresa trvalého pobytu autora práce:

**Bc. Martin Andrysek**  
**Bělkovice-Lašťany 567**  
**783 15 Bělkovice-Lašťany, ČR**

## **ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

ANDRÝSEK, M. *Optimalizace části výrobního procesu: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická universita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2014, XX s. Vedoucí práce: Novák, J.

Diplomová práce se zabývá optimalizací části výrobního procesu ve společnosti Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. Optimalizace části výrobního procesu obsahuje stanovení indexů způsobilosti a kritických indexů způsobilosti, nástroje štíhlé výroby a testy na opakovatelnost systému měření a plánovaný experiment.

## **ANNOTATION OF MASTER THESIS**

ANDRÝSEK, M. *Optimization of Part Production Process: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering. Department of Machine Parts and Mechanisms, 2014, XX p. Thesis head: Novák, J.

Master thesis deals with optimization of part production process at company Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. Optimization of part production process contain clarification of capability indexes a critical capability indexes, lean production tools and tests for process repeatability and design of experiment. T

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

BSC	Balanced Scorecard (systém vyvážených ukazatelů výkonnosti podniku)	[-]
$C_d$	kompensační koeficient	[-]
$CO_2$	Oxid uhličitý	[-]
COPQ	Cost of Poor Quality (náklady na nekvalitu)	[\$]
$C_p$	index způsobilosti procesu	[-]
$C_{pk}$	kritický index způsobilosti procesu	[-]
CTQ	Critical to Quality (kritické parametry jakosti)	[-]
$d_2$	průměr otvoru $S_2$	[mm]
$d_i$	průměr každého otvoru	[mm]
DMAIC	Define, Measure, Analyze, Improve, Control (Definování, Měření, Analýza, Zlepšování, Řízení)	[-]
DOE	Design of Experiment (plánovaný experiment)	[-]
DPMO	Defects per Milion Opportunities (Defekt na milion příležitostí)	[-]
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis (analýza možného výskytu a vlivu vad)	[-]
$\gamma$	Poissonova konstanta	[-]
ISO	International Organization for Standardization (Mezinárodní organizace pro normalizaci)	[-]
k	geometrický kompenzační koeficient	[-]
LCL	Lower Control Limit (dolní kontrolní limit)	[-]
M	Machovo číslo	[m.s <sup>-1</sup> ]
$\dot{m}$	hmotnostní průtok	[g.s <sup>-1</sup> ]
Nd:YAG	yttrium-aluminium-granat dopovaný neodymem	[-]
Po	vstupní tlak	[Pa]
R	molární plynová konstanta	[JK <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup> ]
RPN	Risk Priority Number (míra rizika)	[-]
S	plocha kruhového otvoru	[mm <sup>2</sup> ]
$S_2$	plocha kruhového otvoru $S_2$	[mm <sup>2</sup> ]
$S_e$	efektivní plocha kruhového otvoru	[mm <sup>2</sup> ]
$S_i$	průřez jednotlivými otvory	[mm <sup>2</sup> ]
SIPOC	Supplie, Input, Process, Output, Customer (dodavatel, vstup, process, výstup, zákazník)	[-]
SPC	Statistical Process Control (statistická regulace procesu)	[-]
TEM	Transverse Electromagnetic Mode (příčné elektromag.pole)	[-]
To	teplota na vstupu	[°C]

TPM	Total Preventive Maintenance (totálně preventivní údržba)	[-]
UCL	Upper Control Limit (horní kontrolní limit)	[-]
h	Planckova konstanta	[J.s]
$\nu_{mn}$	frekvence světelného záření	[s <sup>-1</sup> ]

# Obsah

Úvod .....	11
1 Letecké motory .....	12
1.1 Historie letectví .....	12
1.2 Účel letadlové pohonné jednotky .....	12
1.3 Rozdělení letadlových pohonných jednotek .....	13
1.4 Dvouproudové motory .....	14
1.4.1 Rozdělení dvouproudových motorů .....	15
1.5 Detailní popis spalovací komory lopatkového leteckého motoru HTF7000 .....	15
1.5.1 Podsestavy plamence spalovací komory HTF7000 .....	16
2 Chlazení spalovací komory lopatkového leteckého motoru .....	18
2.1 Technologie výroby efúzních otvorů spalovacích komor obráběním laserem .....	19
2.1.1 Princip funkce laseru .....	19
2.1.2 Vlastnosti laserového paprsku .....	19
2.1.3 Konstrukce laseru .....	20
2.1.4 Vrtání laserem .....	21
2.2 Teoretický výpočet parametrů efúzních otvorů .....	22
2.2.1 Průtočná plocha .....	22
2.2.2 Efektivní průtočná plocha .....	22
2.2.3 Měření efektivní průtočné plochy .....	23
2.2.4 Popis měření průtočné plochy na zařízení SF-1020 .....	23
3 Řízení kvality průmyslových procesů - Six Sigma .....	25
3.1 Podniková praxe .....	25
3.2 Historie Six Sigma .....	25
3.3 Six Sigma .....	26
3.3.1 Požadavky konkurence .....	27
3.4 DMAIC metodologie .....	27
3.4.1 Logická podstata DMAIC .....	29
3.5 Statistická regulace procesu – SPC .....	30
3.6 Regulační diagramy .....	31



3.6.1 Normálně rozdělená data .....	32
3.6.2 Rozdělení variability .....	33
3.6.3 Index způsobilosti a kritický index způsobilosti .....	34
3.6.4 Statistický pohled .....	35
3.6.5 Stupně způsobilosti procesu.....	37
3.7 Opakovatelnost systému měření - Gage R&R.....	37
3.8 Významnost vlivu procesních faktorů – Plánovaný experiment (DOE) .....	38
3.8.1 DOE – plné faktoriální versus zkrácené faktoriální experimenty .....	39
4 Experimentální část.....	40
4.1 Cíle diplomové práce .....	40
4.2 Aktuální stav .....	40
5 DMAIC .....	41
5.1 Definovat .....	42
5.1.1 Myšlenková mapa .....	42
5.1.2 SIPOC .....	43
5.2 Měřit .....	44
5.2.1 Procesní mapa .....	45
5.3 Analyzovat .....	46
5.3.1 Rybí kost .....	46
5.3.2 FMEA .....	48
5.4 Zlepšení.....	50
5.4.1 Regulační diagramy .....	50
5.4.2 Náhodná variabilita.....	51
5.4.3 Test opakovatelnosti systému měření pomocí trnů - Gage R&R.....	53
5.4.4 Test opakovatelnosti systému měření efektivní průtočné plochy - Gage R&R .	57
5.4.5 Významnost vlivů procesních faktorů při měření efektivní průtočné plochy – Plánovaný experiment (DOE).....	59
5.5 Řízení .....	62
5.5.1 Statistická regulace procesu výroby efúzních otvorů .....	63
5.5.2 Plán na udržitelné řízení procesu .....	67

6 Závěr.....	69
7 Seznam použité literatury .....	71
8 Seznam příloh .....	73

## Úvod

Tato práce se zabývá optimalizací části výrobního procesu měření průtoku vzduchu ve společnosti Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o., s cílem předpověditelného procesu nominálního (finálního) měření průtoku vzduchu na detailech sestavy plamence spalovací komory lopatkového leteckého motoru HTF7000, který je reprezentován zvýšením indexů způsobilosti procesu a kritických indexů způsobilosti s cílem 1,33. Tato hodnota následně reprezentuje proces ve stavu  $3\sigma$ . Jako metodický postup práce byl zvolen DMAIC ze systému řízení kvality Six Sigma.

Práce je rozdělena do několika kapitol. Úvodní kapitoly jsou věnovány obecnému představení oboru letectví, kterým se zabývá společnost Honeywell a dalšímu rozdělení leteckých motorů, jejich konstrukci a chlazení plamenců spalovacích komor. Další část diplomové práce se zabývá technologií pro výrobu chladících otvorů vrtání laserem a samotným principem funkce laseru. Následující kapitola řeší teoretický výpočet parametrů chladících otvorů a stanovení jejich efektivní průtočné plochy. Dále je v práci obsaženo obecné představení systému řízení kvality Six Sigma a metodologie DMAIC, která je použita v praktické části diplomové práce. Do této metodologie spadá i statistická regulace procesu spolu s normalitou rozdělení dat, indexem způsobilosti a kritickým indexem způsobilosti procesu, testy na opakovatelnost systému měření a test na významnost vlivu procesních faktorů.

...

# 1 Letecké motory

## 1.1 Historie letectví

Úsilí o překonání zemské tíže a ovládnutí třetího rozměru, doprovázené řadou vítězství i nezdarům mělo i duchovní dimenzi a obohacovalo člověka. Je málo oborů lidské činnosti, které tak výstižně jako letectví ilustrují věčnou touhu člověka po poznání a uskutečnění jeho cílů.

První let člověka se uskutečnil letadlem lehčím než vzduch dne 21. 11. 1783. použitý horkovzdušný balón zkonstruovali bratři Joseph a Etien Montgolfierové. Ve stejné době prováděl fyzik Jacques A. Charles své pokusy s balónem plněným vodíkem. Charles, který si uvědomoval nutnost pohonu pro řízený let, neúspěšně použil k tomuto účelu vesla.

První vědecký projekt říditelného motorového letadla lehčího než vzduch předložil Victor Meusnier v roce 1775. V návrhu zdůvodnil nezbytnost použití síly vyvozované vrtulí pro řízený let. Otazku pohonu vrtule však nedokázal vyřešit. V té době neexistoval použitelný zdroj energie.

Letadla těžší než vzduch využívají k překonání zemské tíže aerodynamických sil působících na povrch nosných ploch a trupu. Tento princip letu pozorovali lidé u ptáků plachtařů, aniž by si uvědomovali jeho fyzikální podstatu.

Základy teorie letu letadel těžších než vzduch představil Sir George Cayley (1773-1857), který použil poprvé rozklad aerodynamické síly na složku vztlačovou a složku odporovou. Z toho vyplynula nutnost použít propulzní síly k překonání odporu a tuto si představoval jako výsledek činnosti motoru.

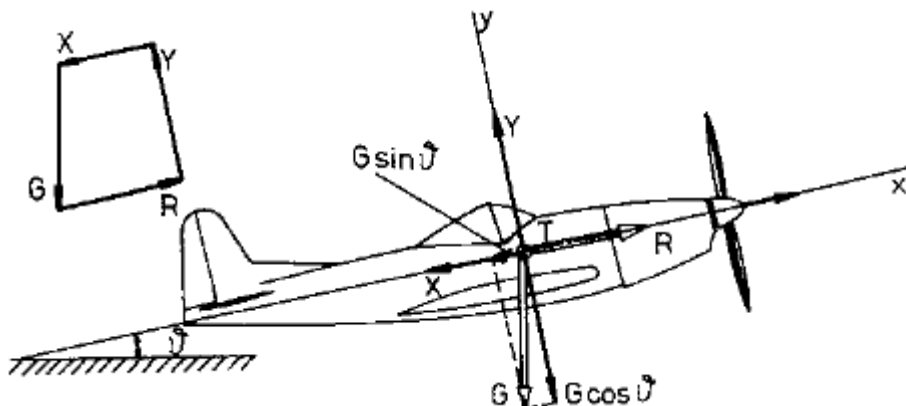
Teprve v minulém století umožnil rozvoj přírodních věd zdokonalení telených strojů, které vedlo ke konstrukci prvních motorů použitelných v letectví. [16]

## 1.2 Účel letadlové pohonné jednotky

Za letu působí na letadlo následující vnější síly, viz Obr.1:

- Tíha letadla  $G$
- Aerodynamická síla  $F_k$ , kterou je možno rozdělit na následující podsložky:
  - o Vztlak  $Y$
  - o Odpor  $X$
- Tah motoru  $R$

Zjednodušeně předpokládáme rovnoměrný přímočarý pohyb ve svislé rovině, která je rovinou souměrnosti letadla. Tento pohyb je určen pohybem těžiště.



Obr. 1: Síly působící na letadlo při letu [16]

### 1.3 Rozdělení letadlových pohonných jednotek

Pohonná jednotka se skládá ze zdroje mechanické energie a zařízení, které ji přeměňuje na tahovou sílu. Podle způsobu této přeměny rozlišujeme pohon:

- a) Vrtulový
- b) Proudový
- c) Raketový

U všech tří způsobů pohonu jde o stejný princip. Tahové síly se dosáhne zrychlením tekutiny, kterou může být okolní vzduch u vrtulového a proudového pohonu, nebo jiná látka, kterou si letadlo nese sebou v případě raketového pohonu. [16]

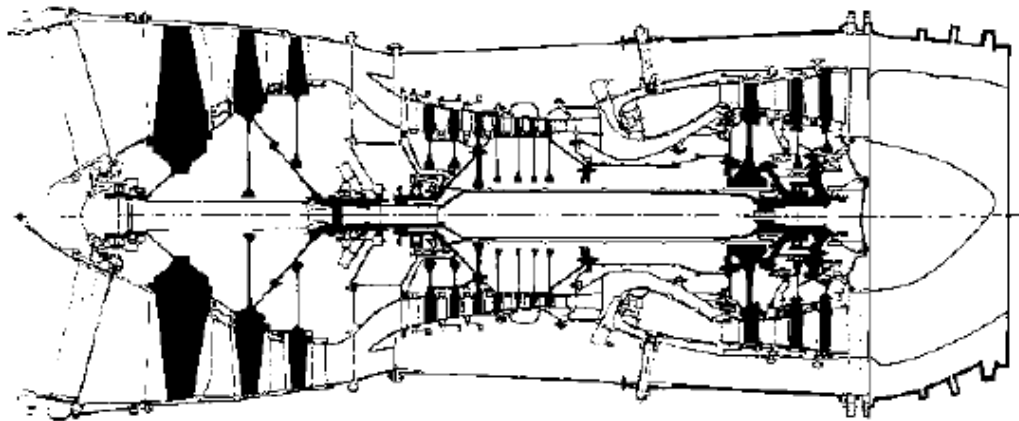
Zdrojem mechanické energie je motor, jehož konstrukce závisí na druhu pohonu. Rozdělení letadlových pohonných [16]:

- Tryskové
  - Bez lopatkové
    - Pulzační
    - Náporové
  - Lopatkové
    - Proudové
    - Dvouproudové
    - Turbo-hřídelové
  - Raketové
    - Tuhé pohonné hmoty
    - Kapalné pohonné hmoty

- Hybridní pohonné hmoty
- Vrtulové
  - Pístové
  - Turbovrtulové
  - Reaktivní vrtule

### 1.3.1 Proudové motory lopatkové

Proudový motor (Obr. 2) pracuje na principu kompresí nasávaného vzduchu přes vstupní usměrňovací ústrojí a stlačuje jej. Stlačený vzduch proudí do spalovací komory, kde se do něj vstříkuje palivo. V důsledku hoření paliva za konstantního tlaku roste teplota plynů, spalín, a tím i jejich tepelná energie. Spaliny proudí dále přes rozváděcí lopatky do oběžných lopatek turbíny, kde předávají část své energie turbíně, která slouží k pohonu kompresoru. Za turbínou však plyny mají stále ještě vyšší tlak než okolní atmosféra a jsou dále vedeny do hnací trysky. V hnací trysce se tepelná a tlaková energie mění v kinetickou, která vyvoluje tah motoru. [16]



Obr. 2: Proudový motor lopatkový [16]

### 1.4 Dvouproudové motory

Důvod přechodu z jednoproudového na dvouproudový motor je v rozsahu rychlostí dnešních dopravních letadel. Dvouproudový motor dosahuje nejvyšší propulsní účinnosti, které lze dosáhnout urychlením malého množství vzduchu na velkou rychlost, nebo velkého množství na podstatně menší rychlost a to při hlučnosti podstatně nižší. Všechny tyto důvody způsobily rychlý rozvoj a rozšíření dvouproudových motorů. Můžeme říci, že nenajdeme v provozu letadlo, které by bylo poháněno jednoproudovými motory. V této kategorii letadel

dominují motory dvouproudové. Dvouproudové motory mají výrazně menší výtokovou rychlost plynů než motory proudové a v důsledku toho mají i nižší hladinu hluku.

#### **1.4.1 Rozdělení dvouproudových motorů**

Dvouproudové motory se dělí na motory:

- S předním obtokem
- Se zadním obtokem

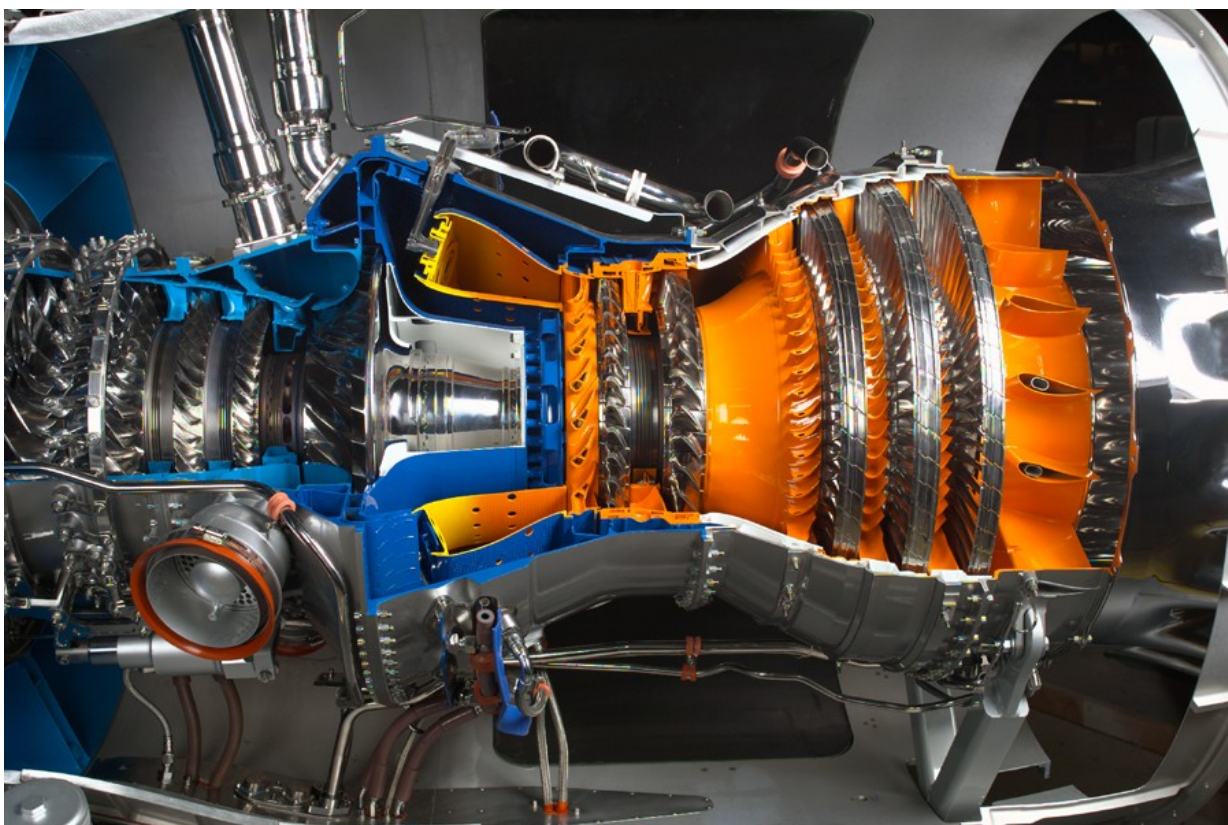
Motory s předním obtokem jsou nejrozšířenější.

Podle velikosti obtokového poměru rozeznáváme motory s malým a velkým obtokovým průměrem. Hranice určující malý a velký obtokový poměr není jednoznačně stanovena, dá se ale říci, že za motory s velkým obtokovým poměrem považujeme motory ventilátorové.

Dvouproudé motory jsou vždy dvourotorové, nebo třímotorové konstrukce. Tah motoru se skládá z tahu vnitřního proudu a tahu vnějšího proudu. [16]

### **1.5 Detailní popis spalovací komory lopatkového leteckého motoru HTF7000**

Dvouproudový letecký motor HTF7000 (Obr. 3) má souproudou prstencovou spalovací komoru neboli plamenec. Prstencová komora využívá celého prostoru kolem rotoru. Komora je tvořena vnitřní a vnější stěnou plamence. Dále v horní části komory mezi vnitřním a vnějším pláštěm je dóm (hlavice), na kterém jsou umístěni palivové trysky s rozprašovači paliva. Vzduch vstupuje do komory poměrně velkou rychlostí – 110 až 140  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Tato rychlost musí být snížena v difuzoru asi na 1/3 původní hodnoty. V komoře se rozdělí na dva proudy – primární, který se účastní vlastního hoření, a sekundární, který slouží pro ochlazení stěn plamence a hlavně po smíchání s primárním proudem k ochlazení spalín vstupujících do turbíny. Uvážíme-li, že střední teplota v jádru plamene dosahuje hodnoty 2400 K, je potřeba k ochlazení primárního proudu 3 až 7krát více vzduchu, než se účastní hoření. Z toho vyplývá, že kontrola objemového průtoku vzduchu chladícími a sekundárními otvory musí být co nejpřesnější. V provozu je důležité kontrolovat plamenec spalovacích komor na trhlinky a propálení. Vypadnutí části stěny je velmi nebezpečné pro možnost vážného poškození turbíny.

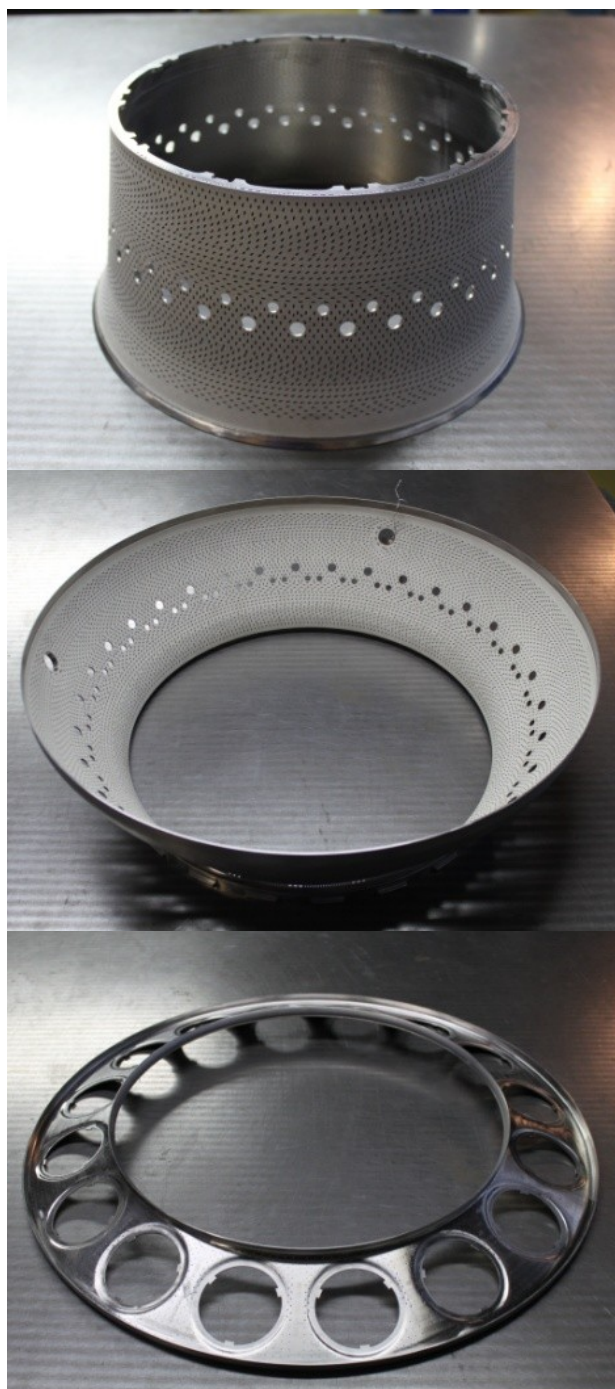


Obr. 3: Řez motoru HTF7000

### 1.5.1 Podsestavy plamence spalovací komory HTF7000

Podsestavy plamence spalovací komory (Obr. 4) jsou vyrobeny převážně svařované ze žáruvzdorného plechu tloušťky 1,2 až 1,4 mm bohatě perforovaného, vyztuženého různými nákrůžky, prolisy, nebo žebry. Hlavice (dóm) plamence je dále osazen tenkostěnnými odlitky z žárovevných materiálů.





Obr. 4: Podsestavy plamence motoru HTF7000

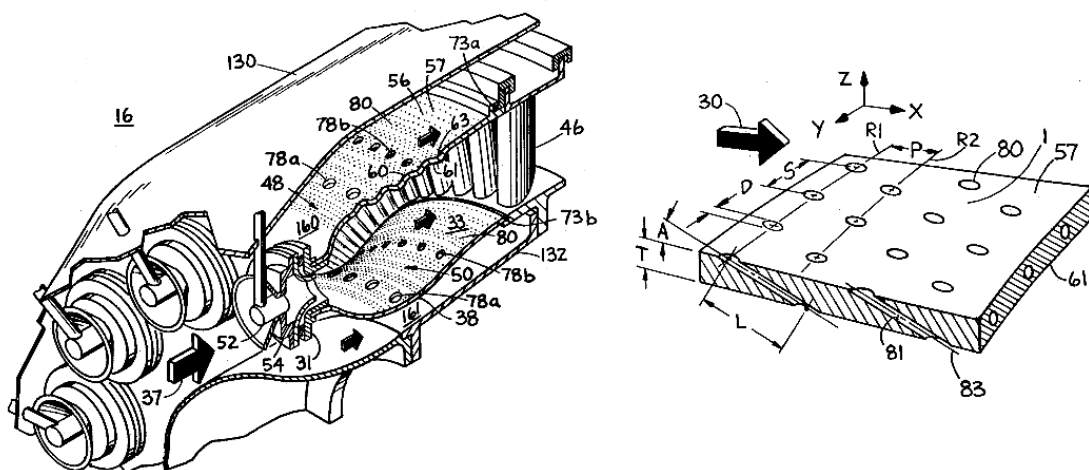
## 2 Chlazení spalovací komory lopatkového leteckého motoru

Pro chlazení spalovací komory lopatkového motoru se nejčastěji používá chladících otvorů umístěných v místě přesazení jednotlivých panelů (Obr.5). Cílem tohoto řešení je vytvořit souvislý proud vzduchu podél stěny plamence a vytvořit tak vzduchovou bariéru mezi plamenem a stěnou plamence.



Obr. 5: Umístění chladících otvorů [15]

Nejnovější metoda chlazení plamce vychází z principu efúze. Což je výtok plynu pod tlakem malým otvorem (kapilárou). Panely plamence jsou osazeny různě uspořádanými efúzními otvory, viz Obr.6, které vytvářejí tenký film vzduchu s potřebnou intenzitou. Na rozdíl od klasického uspořádání chladících otvorů mají efúzní otvory výhodu lepšího rozmístění a s tím související vyšší účinnost na potřebných místech. Pro výrobu těchto otvorů se používá metoda vrtání laserem a v ojedinělých případech metoda vrtání elektronovým paprskem. [14]



Obr. 6: Plamenec s efúzními otvory [14]

## **2.1 Technologie výroby efúzních otvorů spalovacích komor obráběním laserem**

Obrábění laserem spolu s obráběním elektronovým paprskem jsou jedinými metodami, které vzhledem k požadavkům kvality a ceny výroby, jsou schopny efektivně vyrobit efúzní otvory na plášti plamence. [8]

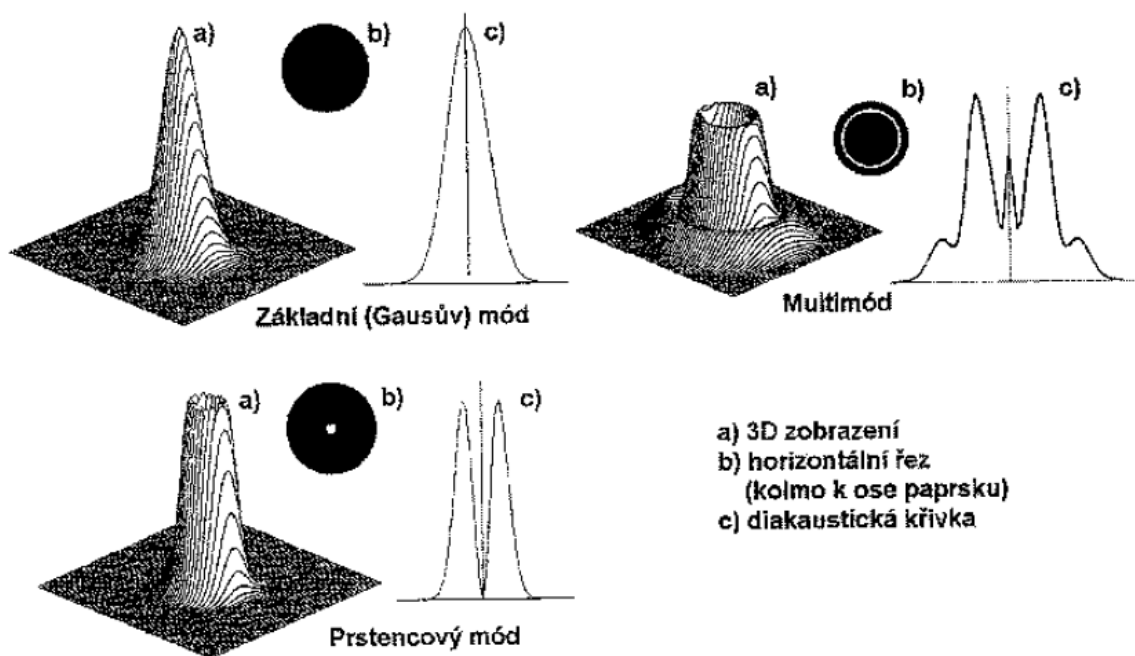
### **2.1.1 Princip funkce laseru**

Pomocí planetárního modelu atomu a na základě pojmů kvantové fyziky je možné objasnit princip funkce laseru. Překlad akronymu laser znamená zesilování světla s využitím stimulované emise. Slovo laser je však běžně používáno pro označení generátoru optického záření. Zesilování optického záření představuje laserový zesilovač.

Běžné světelné záření je vlnění, které se šíří všemi směry. Světlo laseru vzniká v prostředí stimulujícího elektromagnetického záření potlačením spontánní emise na úkor vynucené emise záření. [8]

### **2.1.2 Vlastnosti laserového paprsku**

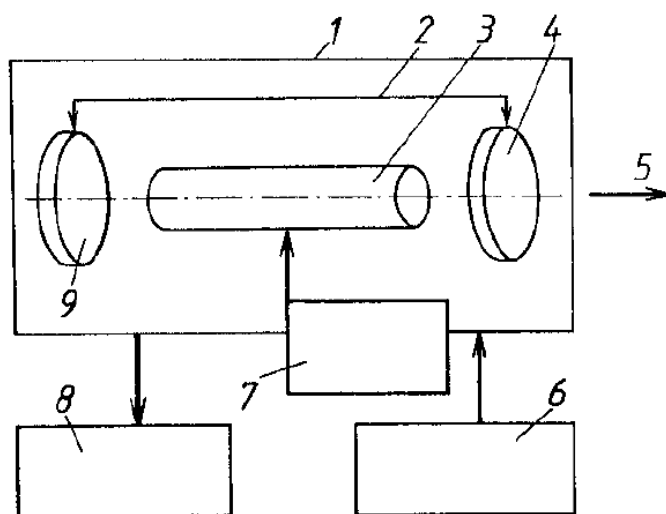
- Je vysoce monochromatické, takže světlo v laserovém paprsku má prakticky jen jednu vlnovou délku.
- Má vysoký stupeň prostorové a časové koherence a v prostorově koherenčním svazku kmitají všechny částice světelné vlny se stejnou fází v rovině kolmé na směr šíření svazu. V časově koherenčním svazku kmitají se stejnou fází všechny částice světelné vlny ve směru šíření laserového paprsku.
- Laserový paprsek má vysokou výstupní intenzitu, která není limitována zákony záření absolutně černého tělesa.
- Má minimální rozbíhavost.
- V příčném průřezu vytváří svazek buď jednoduchou stopu, nebo složitější obrazce. Nejvyšší hustoty energie při dané výstupní energii laseru můžeme dosáhnout u laserů pracujících v základním nastavení TEM (Transverse Electromagnetic Mode). To charakterizuje symetrii elektromagnetického pole (Obr. 7) v rovině kolmé na směr laserového svazku. Toto nastavení laseru určuje jeho vhodnost pro použití v daném průmyslu. [9]



Obr. 7: Rozdělení tvarů paprsků [8]

### 2.1.3 Konstrukce laseru

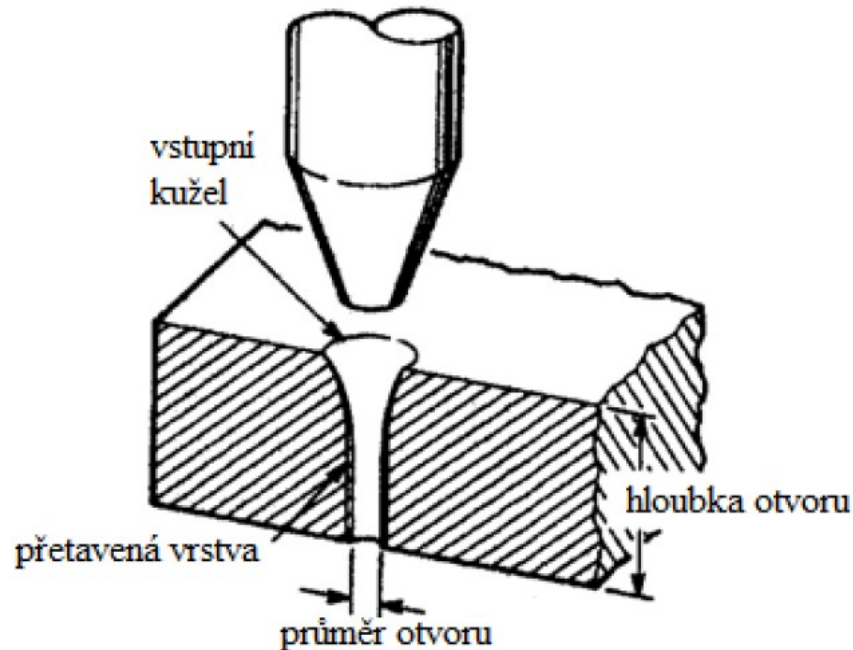
Konstrukce zařízení laseru (Obr.8) a jeho řešení jsou samozřejmě u každého výrobce odlišná. Hlavní části každého laseru jsou však stejné, protože je spojuje stejný princip.



Obr. 8: 1 – laserová hlavice, 2 – rezonátor, 3 – laserový pomocný plyn, 4 – polopropustné zrcadlo, 5 – výstupní tryska, 6 – zdroj energie buzení, 7 – budící zařízení, 8 – ochlazovací systém, 9 – zrcadlo [10]

### 2.1.4 Vrtání laserem

Při vrtání ohřívá laserový svazek povrch materiálu rychlostí přibližně  $10^{10} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ , materiál se tím odpaří a umožní tak průnik paprsku hlouběji do povrchu. Na vrtání otvorů se používá svazek v kontinuálním, ale i pulzním režimu. Z hlediska tepelně ovlivněné zóny je vrtání otvorů v pulzním režimu výhodnější. Přetavená vrstva a ovlivněná zóna je menší než při režimu kontinuálním. [7]



Obr. 9: Schéma vrtaného otvoru [7]

Nejčastěji používané lasery pro vrtání:

- CO<sub>2</sub> lasery slouží k vyřezávání tvarových otvorů. Excimerové lasery – vrtán do keramiky.
- Nd:YAG lasery se zabývají vrtáním děr o menším průměru. Nejmenší průměr vrtané díry je na tomto zařízení 0,025 mm.

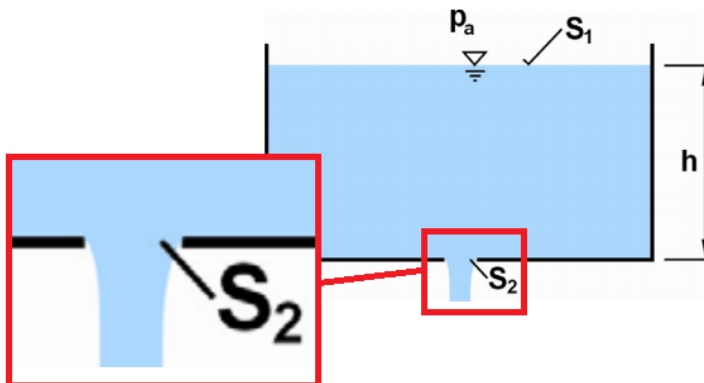
Parametry vrtaných otvorů a jejich průměr a hloubka, jak je vidět na obrázku 9, závisí na řadě faktorů spojených s vlastnostmi obráběného materiálu. Laserové vrtání vyvolává efekt eroze.

V průmyslu se používají převážně Nd:YAG lasery o výstupním výkonu 100 až 500 W. Tloušťka vrtaného materiálu výrazně ovlivňuje délku doby trvání obrábění.

## 2.2 Teoretický výpočet parametrů efúzních otvorů

### 2.2.1 Průtočná plocha

Jako průtočná plocha je označován obsah průřezu otvoru. Určení velikosti průtočné plochy však není tak jednoznačné. Proudění kapaliny otvorem a jeho vyústění provází jev zúžení nebo také kontrakce (Obr. 10). Skutečný průtočný průřez je tedy menší, než geometrický průřez otvoru.



Obr. 10: Kontrakce proudy kapaliny

Geometrický průřez kruhového otvoru:

$$S_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} [\text{mm}^2] \quad (2.1)$$

Geometrický průřez větším počtem kruhových otvorů:

$$S = \sum S_i = \sum \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} [\text{mm}^2] \quad (2.2)$$

### 2.2.2 Efektivní průtočná plocha

již bylo zmíněno výše, skutečný průřez je menší, než geometrický. Zmíněné zúžení nebo kontrakce má na tuto skutečnost vliv, ale v praxi se pro tuto kompenzaci využívá koeficient  $k = 0,97$ . Tato kontrakce má tedy velmi malý, i když záleží na posouzení, vliv.

Největšího rozdílu oproti plánované geometrické průtočné ploše dosáhneme, vstupuje-li nám do výpočtu vliv tvaru samotné průtočné plochy. Pokud je například otvor kónický, šišatý, nebo kombinace obou těchto vlivů, tak tradiční metody výpočtu již nereflektují skutečnost. [12]

Tento jev vyjadřuje kompenzační koeficient  $C_d$ , který se vyjádří jako:

$$C_d \equiv \frac{\text{Aktuální průtok}}{\text{Teoretický průtok}} < 1.0 \quad (2.3)$$

Efektivní průtočná plocha se tedy vyjádří jako:

$$S_e = S \cdot C_d [mm^2] \quad (2.4)$$

### 2.2.3 Měření efektivní průtočné plochy

Pro měření efektivní průtočné plochy se používá sonických trysek (Venturiho trubice), jako zařízení na měření parametrů průtoku vzduchu na průtočném okruhu.

Zařízení tedy obsahuje Venturiho rozvaděče pro kritické proudění, potrubí a pneumatické kontrolní zařízení pro sběr dat a ovládání řídicího systému, dále zařízení na kontrolu tlaku a teploty. Počítačový software zpracovává otevírání a zavírání kritického průtoku Venturiho průtokovými cestami a vypočítává průtok vzduchu na základě vstupů ze snímačů. Tento software také monitoruje podmínky proudění vzduchu, aby bylo zajištěno, že sonické trysky jsou v "přidušeném" stavu, a že tok je stabilní. [12]

Efektivní průtočná plocha  $S_e$  je následně zařízením určena pomocí tohoto vztahu:

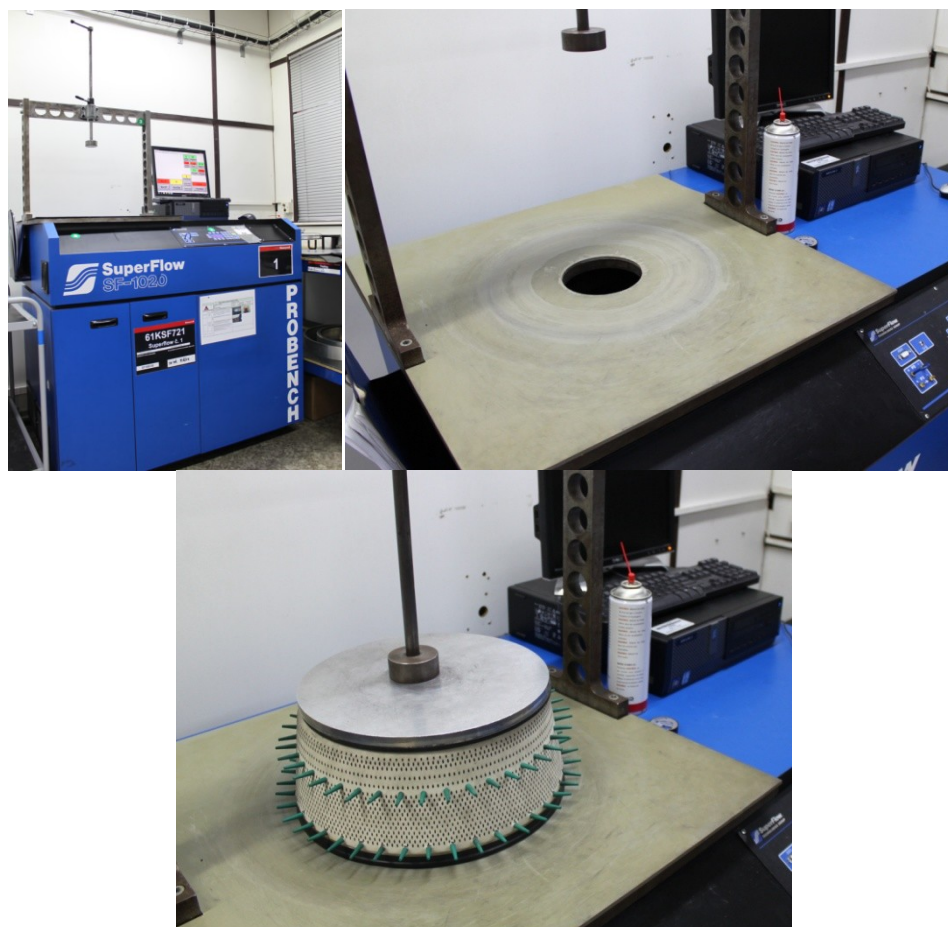
$$S_e = \frac{\dot{m} \sqrt{T_0}}{P_0} \cdot \sqrt{\frac{R}{\gamma}} \cdot \frac{(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}}{M} [mm^2] \quad (2.5)$$

### 2.2.4 Popis měření průtočné plochy na zařízení SF-1020

Měření probíhá v klimatizované místnosti, aby výsledky nebyly ovlivněny teplotou na pracovišti. Zařízení pro měření průtočné plochy je SuperFlow SF-1020.

Dílce se před samotným měřením musejí zamaskovat, kdy se pomocí ucpávek utěsní primární a sekundární otvory na dílci, dle obrázku 11. Dále se dílce ustaví na měřicí zařízení a pomocí spreje Gazobul se kontroluje těsnost celé měřicí sestavy. Měření provádí operátor na pět opakování a jako výsledná hodnota je označen průměr těchto pěti měření.

Operátor před spuštěním měření musí na stroji nastavit směr proudění vzduchu (Flow Mode), jestli bude nasávat vzduch dovnitř nebo foukat ven z dílce (intake, exhaust).



Obr. 11: Ilustrace měření na stroji SF1020



### 3 Řízení kvality průmyslových procesů - Six Sigma

Six Sigma je úplný a flexibilní systém dosahování, udržování a maximalizace obchodního úspěchu.

#### 3.1 Podniková praxe

V podnikové praxi vede velký počet rozdílných konceptů a metod řízení kvality spíše ke zmatku než ke konzistentnímu procesu zavádění a vývoje. Klíčovou otázkou je vždy to, jedná-li se o duplicitní, nebo účelová doplnění systému danou metodou, či konceptem. Existuje však možnost propojení těchto koncepcí. Na základě ISO 9000:2000, které je v mnoha podnicích z hlediska zákazníka povinností se bude efektivní systém řízení a vedení ve formě Balanced Scorecard (BSC). Na tomto základě se dají projekty Six Sigma účinně zrealizovat. Je třeba provádět výzkumy, hlavně ve vztahu k cílenému propojení a zabudování s ostatními koncepty Business Excellence. Vedle silně operativně zaměřených průzkumů nabízí strategické aspekty Six Sigma v rámci tržně orientovaného vedení podniku široké pole i pro výzkum. V popředí stojí kvalifikační koncepty, motivační, měřicí a řídicí systémy, ohled na podnikovou kulturu a implementační strategie i analýzy úspěchu managementu změny. [6]

#### 3.2 Historie Six Sigma

Ze statistického hlediska se Six Sigma opírá o poznatky staré téměř 200 let. Jejich autorem je matematik Carl Friederich Gauss a důležitost je evidentní i díky tomu, že jeho podoba a normální rozdělení byly vyobrazeny na někdejší 10-ti markové bankovce. Této matematické funkci se přikládá při statických kontrolách kvality odjakživa vysoký význam.

Současným autorem konceptu Six Sigma je Bill Smith (1929-1993), který v roce 1986 zavedl v Motorole posuzování kvality na základě měření směrodatných odchylek proměnlivosti procesů. Posuzovat kvalitu nikoliv na základě výrobků, ale výrobního procesu nebyla v té době originální myšlenka. Avšak zavedení měřítka Six Sigma (ve zkratce: vše co je mimo oblast šesti směrodatných odchylek je špatně) a vypracování celé metodologie založené na struktuře DMAIC v projektech zlepšování, je již Smithova zásluha. Nový přístup ke zlepšování procesů byl ředitelem Motoroly (CEO) Bobem Galvinem přijat a podporován tak, že se záhy stal hlavní filozofií Motoroly.

V roce 1995 začíná Six Sigma zavádět Jack Welch v General Electric a úspěšnou implementací dokazuje, že Six Sigma může být neobyčejně úspěšná i v oblasti služeb, konkrétně bankovníctví.

V současné době nalezneme mnoho úspěšných aplikací Six Sigma v nejrůznějších oblastech průmyslu i služeb. Velká většina těchto aplikací přináší organizacím obrovské úspory. [6]

### 3.3 Six Sigma

Zásadním poznatkem v souvislosti s filozofií Six Sigma a s jejím uvedením do praxe je to, že většina součástí programu Six Sigma jako konceptu řízení kvality není až tak nová. Je to dobře, protože se tak zvyšují šance na realizaci Six Sigma v podniku spolu s progresivním řízením kvality. Naprosto nová je naopak vytyčená úroveň kvality jako realizovatelná strategie, která připouští za cíl jen 3,4 defektu na milion příležitostí, respektive specifických znaků výrobků nebo činností zaměřených na poskytování služeb.

V bližším slova smyslu to znamená, že – vezmeme-li v úvahu Gaussovo normální rozdělení s mezemi tolerance na úrovni  $6\sigma$  – je třeba zajistit u všech charakteristických znaků procesů a výrobků úroveň kvality ve výši 99,99966%. Průměr německého průmyslu leží kolem  $3,8\sigma$ , což je cca 99,0% kvality na úrovni nulových defektů. Toto nicméně ještě stále představuje více než 10% závadných výrobků nebo služeb na milion příležitostí (DPMO – Defects per Milion Opportunities). [6]

Ke zhoršení tohoto problému kvality dojde tehdy, pokud se jako v běžných případech, výrobek neskládá pouze z jednoho kusu. Vezmeme-li tak výrobek o 10 součástech a 9 krocích montáže, celkem tedy o 19-ti komponentech, které jsou vždy provedeny s 99,0% úrovní kvality, vznikne následně výnos ve výši 83% výrobků bez defektů. Přesně tento problém snižuje nejen kvalitu, ale souběžně zvyšuje i náklady a spotřebovává dodatečný čas na odstranění defektů. Zvláště při inovacích, které na začátku ještě nejsou stabilními procesy a systémy, se tyto negativní vlastnosti objevují nejčastěji.

Otázka tedy už není, jestli je úroveň kvality 99% dostačující pro jednotlivé komponenty a tím úroveň bez defektů akceptovatelná. Defekt vzniká vždy tehdy, jsou-li překročeny a tudíž porušeny výrobní meze. Rozptyl hodnot znaků měřených jejich standardní odchylkou  $\sigma$  od střední hodnoty, definované jako všechny znakové hodnoty pro dosažení dobré kvality by se měly pohybovat v intervalu o délce  $6\sigma$  mezi střední hodnotou a mezemi tolerance. Čím vyšší je úroveň Sigma a tím požadovaná úroveň kvality, tím užší je toleranční

interval a také menší počet defektů. Předpoklad normálního rozdělení hodnot znaků přitom nicméně znamená omezení, které se v podnikové praxi moc často nevyskytuje. [6]

### **3.3.1 Požadavky konkurence**

Kvůli požadavku snížit z finančních důvodů komplexitu výroby vzniká poptávka po dostatečně kvalitních partnerech pro vytváření hodnot. Pro podnik jako takový má zásadní význam i to, mají-li neustále se více podobající výrobky ještě dostatečný potenciál odlišitelnosti. Často je to spojeno s rozšířením obchodních služeb na obchod se službami a servisem. Zbývá pak ještě otázka, jestli je v porovnání s fyzickou výrobou produktů kvalita méně standardizovaných a ovladatelných procesů v oblasti poskytování služeb a servisu dostatečně vysoká, a především, je-li dostatečně stabilní. Veškerý tento vývoj zpravidla provází zostření tlaku konkurence v klíčových obchodech podniku, takže už jenom tím vznikající příležitosti pro úsporu nákladů a navýšení výnosů jsou z pohledu úspěšného podniku životně důležité. [5]

Přitom obecně platí a obzvlášť pro Six Sigma, že rozhodující není zavedení jednoho konceptu, ale dosažitelná úroveň zvýšení hodnoty podniku pomocí celkového splnění požadavků zákazníka, a to z velké části kvalitou na úrovni nulových defektů a nad průměrně pozitivními podnikatelskými výsledky.

Tím se plní čtyři centrální požadavky konkurence. Kvalita, čas, náklady a inovace. Filozofie koncepce a realizace Six Sigma má pozitivní vliv na všechny čtyři výchozí body pro odlišení se od konkurence.

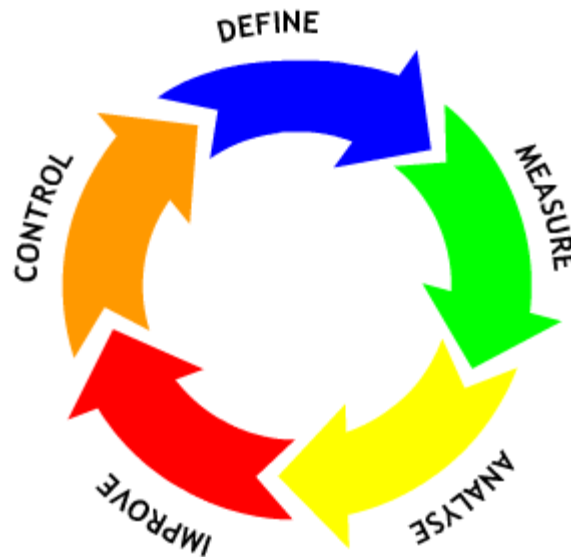
- Výchozí základna pro každý Six Sigma projekt je požadavek zákazníka v podobě Critical to Quality, neboli kritické parametry jakosti (CTQ).
- Zlepšení procesů podnikání je obecně výchozí základnou všech Six Sigma projektů a za cíl má průběžné snížení časů.
- Odstranění a v budoucnu předejití nákladům na nejakost vede dodatečně k úsporám za celkové náklady.

### **3.4 DMAIC metodologie**

Filozofii Six Sigma lze rozdělit podle toho, zda usilujeme o kvalitu na úrovni nulových defektů u stávajících výrobků, nebo u výrobků nových.

V prvním případě spočívá ohnisko ve „zpětně zaměřeném“ vyhodnocení a zvýšení spokojenosti zákazníků pomocí procesu DMAIC (Define = Definování, Measure = Měření,

Analyse = Analýza, Improve = Zlepšování, Control = Řízení). V druhém případě, při realizaci Six Sigma u nových výrobků, je hlavním úkolem zjištění a splnění budoucích důležitých požadavků zákazníka na základě DMADV procesu (Define = Definování, Measure = Měření, Analyse = Analýza, Design = Navrhnout, Verify = Ověření). [5]



Obr. 12: Kruh DMAIC

Vezmeme-li za základ jednoduchý model se třemi kritérii úspěchu, které jsou ve špičkovém produktu, operativní excelenci a úzkém vztahu k zákazníkovi, pak vytváří Six Sigma pozitivní přínos ke všem třem konkurenčním faktorům. Co do obsahu je to hlavní důvod pro v minulosti stále více se rozšiřující Six Sigma mezi průmyslovými podniky a podniky služeb v lokální oblasti, nebo dokonce na globální úrovni. Tím, že je možné dosáhnout úspor nákladů, zkrácení průběžného času a zvýšení výnosů ve vztahu k výsledku se ještě zesílí efekt zvýšení hodnoty.

Tabulka 1 objasňuje kvalitu na úrovni nulových defektů spojenou s určitou Sigma úrovní na milion případů a především takto vznikající náklady na nízkou kvalitu, které tvoří u nižší Sigma úrovně skoro výlučné náklady na nejakost ve smyslu nákladů na jejich odstranění, sledování a nákladů na kontrolu, a jen málokdy je představují náklady na prevenci neshod. Otázku kolik stojí špatná kvalita, lze tedy jednoduše zodpovědět následujícím způsobem. Špatná kvalita stojí:

- Lidi, kteří způsobují neshody v interních procesech nebo v obchodních službách zaměřených externě.
- Lidi, kteří tyto neshody v procesu a výrobě objeví a odstraní.

- Kulantní chování vůči zákazníkům, kteří těmito neshodami a s tím spojeným negativním působením trpí.
- Zákazníky, které na základě špatné pověsti firma ztratí, nebo cílové zákazníky, kteří proto vůbec nepřijdou a výrobky si nekoupí. [6]

Tab. 1: Neshody na milion příležitostí

Sigma	Neshody na milion příležitostí	Náklady na nekvalitu (COPQ)
2	308 537 (podnik neschopný konkurovat)	Nepřijatelné
3	66 807	25% - 40% obratu
4	6 210 (průměrný podnik)	15% - 25% obratu
5	233	5% - 15% obratu
6	3,4 (světová špička)	méně než 1% obratu

### 3.4.1 Logická podstata DMAIC

Ve fázi *Define* je v praxi rozpoznáný rostoucí problém vymezen jako Business Case projektu a co možná nejpřesněji zformulován v projektovém plánu. Ten obsahuje detaily o pozadí problému a stanovení cíle. Ty jsou upřesněny pomocí tří kritérií – kvality, času a nákladů. Projektový rámec a milníky stanovují, jaký průběh připadá projektu, kdo jsou jeho aktéři, jaké jsou k dispozici zdroje a jaké mohou být očekávány mezivýsledky při termínovém průběhu projektu. Pomocí SIPOC analýzy (*Supplier-Input-Process-Output-Customer*) je, s výchozím bodem u zákazníků, provedena jednoduchá forma procesní analýzy ke zvýšení transparentnosti a vymezení problému. Obsahově jsou požadavky upřesňovány tak, že jsou z „hlasu zákazníků“ odvozena centrální témata a sumarizována na kritické jakostní požadavky, jako faktory úspěchu. Jinými slovy SIPOC je jednoduchý diagram identifikující základní prvky procesu (hranice, vstupy dodavatelů, procesní vstupy, kroky, zákazníci a výstupy). Záměrem je vytvořit SIPOC diagram na začátku procesu, aby zachytil pohled na vybranou část procesu z vysoké úrovně. SIPOC je dobrým nástrojem na převod požadavků na zákazníka do požadavků na výstup a pro identifikaci klíčových proměnných vztahujících se k výstupu z procesu. [13]

Ve fázi *Measure* jsou na základě SIPOC analýzy pro CTQ určeny rozhodující výstupní veličiny, pomocí kterých lze co možná nejpřesněji stanovit počet výchozích situací jako referenčního výkonu aktuálních procesů. Pro měření bez chyb s přesností měřicího systému

sama kontroluje pomocí tzv. Gage R&R. V této fázi se zapojuje do projektu hodnota rozptýlení procesu  $C_p$  a hodnota způsobilosti procesu  $C_{pk}$ , jako stálé ukazatele. Aby bylo možné bezprostředně porovnat různé formulace měření v různých procesech, přidává se do projektu další ukazatel v podobě hodnoty Sigma, jako centrální statistický ukazatel pro dosaženou úroveň kvality.

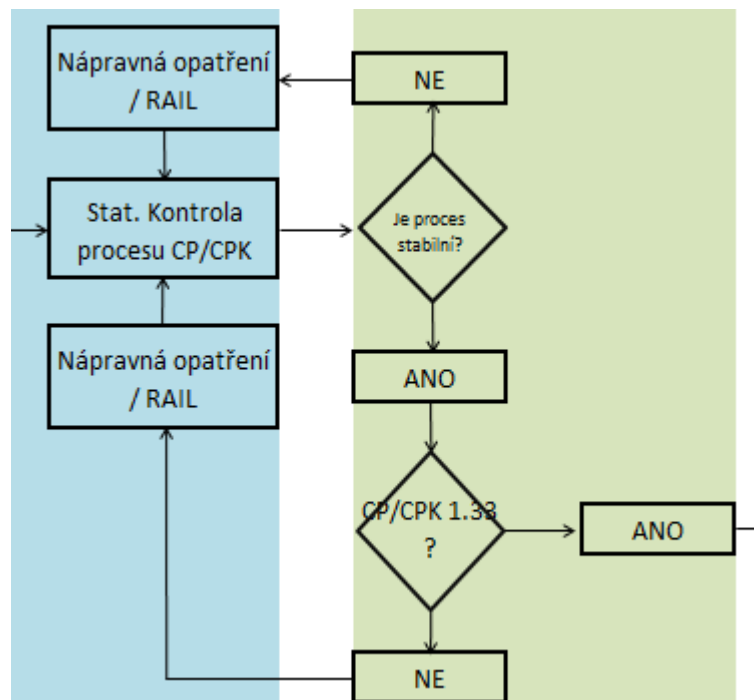
Fáze *Analyze* má za úkol rozpoznat příčiny vyvstávajících jakostních problémů na základě analýzy údajů. Vstupní veličiny jsou proto, jako předtím v opačném směru procesu, přes procesní a vstupní proměnné z procesních a vstupních veličin. Cílem je získat pomocí funkce  $y = f(x_i)$  detailní analýzu příčin a účinků, jako vyobrazení reality. K tomu se používá celá řada známých analytických a statistických nástrojů, jako Ishikawův diagram, FMEA, regresní analýza, Design of Experiment (DOE) a statistické testy. Přitom se rozlišuje v analytickém úseku procesu mezi činnostmi tvorby hodnot, podpory a činnostmi nevytvářející hodnoty.

V popředí fáze *Improve* stojí hledání, testování, a realizace optimálních řešení, respektive variant. Aplikuje se tu i využití kreativních technik, aby se dali pomocí jiného myšlení nacházet nové principy řízení. Na základě formulovaných hypotéz jako možných, či srozumitelných vztahů mezi příčinami a účinky se provádí kontrolované vstupní simulace pro požadovaný plánovaný proces.

Fáze *Control* zajišťuje kontinuitu projektu a jeho udržitelnost v budoucím procesu. Je to závěrečná fáze projektu. Na základě definovaných kroků musí být projekt schopen naplňovat podstatu jeho vzniku. K tomuto úkolu slouží nástroj Control Plan (plán řízení), který zahrnuje úkoly, které vedou k udržitelnosti projektu a budoucímu postupnému rozvoji. [13]

### 3.5 Statistická regulace procesu – SPC

SPC (Statistical Process Control) je zkratkou statistické regulace procesu. Regulace obsahuje opatření, které se provede v případě, že kontrola nevychází. Kontrola je pasivní pozorování procesu, zatím co regulace je aktivní ovlivňování procesu. [6]



Obr. 13: Logický krok projektu

Denně jsou provedeny stovky regulačních zásahů do procesů. Procesy všeobecně obsahují množství kontrol a běžně se řeší, že některá z těchto kontrolních opatření nevyšla, nebo je nedostačující. V případě, že je sledovaný parametr mimo toleranční meze, je potřeba provést případnou reakci. Například viz obrázek 13. Při SPC se musí reagovat mnohem dříve. Při SPC není cílem zasahovat do procesu až v případě nekvality a nehledají se tak zmetky. Při správně prováděné statistické regulaci procesu se právě naopak nesmí nikdy najít zmetek. SPC má tedy za úkol sledovat záruky kvality a Gaussovu křivku, která by se měla pohybovat minimálně v rozmezí tolerančního pole.

### 3.6 Regulační diagramy

Regulační diagramy jsou podobné průběhovým diagramům v tom, že zobrazují naměřené hodnoty v časovém pořadí. Další přímkami pomáhají identifikovat vymezitelné příčiny variability.

- Pro centrální přímkou se používá průměr (odhad střední hodnoty), místo mediánu používaného v průběhovém diagramu.
- Do diagramu jsou přidány regulační meze, které reprezentují rozpětí očekávané variability.

- Regulační meze jsou vzdáleny přibližně o  $\pm 3$  směrodatné odchylky od průměru (99,7% hodnot ze souboru normálně rozdělených dat bude ležet mezi těmito mezemi).
- Regulační meze jsou toleranční meze. Regulační meze se určují z naměřených hodnot a určují, jak se proces skutečně chová. Toleranční meze jsou založeny na požadavcích zákazníka a určují, jak se má proces chovat.

Použití regulačních diagramů

- Ustanovení základní úrovně měření.
- Odhalení vymezitelných příčin variability.
- Zajištění stability procesu a umožnění predikcí.
- Sledování procesu v průběhu času.
- Potvrzení dopadu činností vedoucích ke zlepšení procesu.

Test na vymezitelné příčiny předpokládá, že použitá data jsou normálně rozdělena. Jestliže rozdělení zakreslovaných dat není normální, nelze použít regulační meze k odhalení okolností způsobujících, že je proces mimo kontrolu, jako jsou například odlehlé hodnoty.

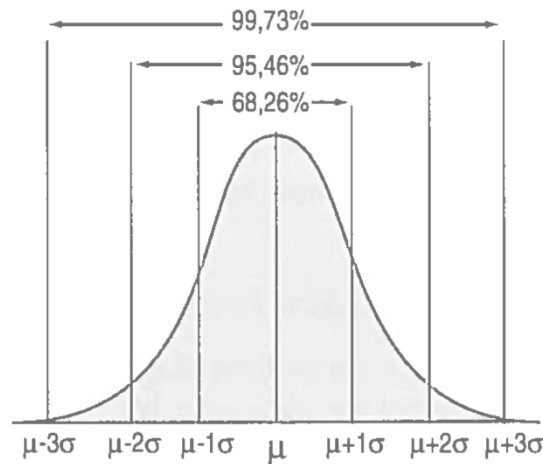
### 3.6.1 Normálně rozdělená data

V mnoha situacích mají data tvar normálního rozdělení (zvonovitá křivka, Obr.14). Jedna z klíčových vlastností normálního rozdělení je vztah mezi tvarem křivky a směrodatnou odchylkou ( $\sigma$  pro populaci). [6]

- 99,73% oblasti pod křivkou normálního rozdělení leží mezi  $-3$  směrodatnými odchylkami a  $+3$  směrodatnými odchylkami od průměru.
- Jiné vyjádření, 0,27% dat se nachází ve vzdálenosti větší než 3 směrodatné odchylky od průměru; 0,135 spadne pod  $-3$  směrodatné odchylky a 0,135 nad  $+3$  směrodatné odchylky.

Pro aplikování těchto pravděpodobností musí být data náhodná, nezávislá a normálně rozdělená.





Obr. 14: Gaussova křivka normálního rozdělení

### 3.6.2 Rozdělení variability

#### 1) Náhodná variabilita

Variability způsobená náhodnými změnami faktorů, které jsou v procesu přítomny vždy.

- Proces, jehož variability má pouze náhodné příčiny, se vždy nazývá procesem ve statisticky zvládnutém stavu (nebo pod statistickou kontrolou).
- Ačkoli je variabilita náhodná, bude stabilní a předvídatelná s určeným rozpětím.
- Proces ve statisticky zvládnutém stavu může být nicméně nepříjemný kvůli příliš velké variabilitě – tzn., že výstup může být nepříjemný pro zákazníka a/nebo může přinést příliš mnoho druhotných nákladů.
- Jediným způsobem jak omezit běžné příčiny variability, je zásadní změna systému – znovu-navržení procesu tak, aby byl výstup ovlivněn odlišnými faktory.

#### 2) Vymezitelná příčina

Také nazývána speciální příčina variability – variabilita nad rámec běžných příčin variability vzniká z faktorů, které nejsou v procesu přítomny stále.

- Každý proces má náhodné příčiny variability. O procesu, který má také vymezitelné příčiny variability, se říká, že je mimo kontrolu.
- Variabilita způsobená vymezitelnými příčinami není náhodná (vytváří identifikovatelné zákonitosti), ale nelze předvídat, kdy se objeví nebo jaký bude její dopad (takže je nestabilní a nepředvídatelná).

- Vymezitelné příčiny variability lze omezit nalezením a odstraněním určitých vymezitelných kořenových příčin, hledáním co je odlišného v procesu, když se objeví vymezitelná příčina.

Datový diagram (I Chart) zachycuje změny průměrné hodnoty procesu a graficky znázorňuje dlouhodobou variabilitu, pomocí individuálních hodnot. Kritéria jsou znázorněny v tabulce 2.

Tab. 2: Kritéria datového diagramu [5]

Centrální přímka	$\bar{X}$	průměr z datových bodů
UCL	$\bar{X} + 2,66mR$	horní kontrolní limit
LCL	$\bar{X} - 2,66mR$	dolní kontrolní limit

Diagram pro rozpětí (Moving Range Chart) zobrazuje krátkodobou variabilitu, pomocí klouzavých rozpětí. Kritéria tohoto diagramu jsou zobrazeny v tabulce 3.

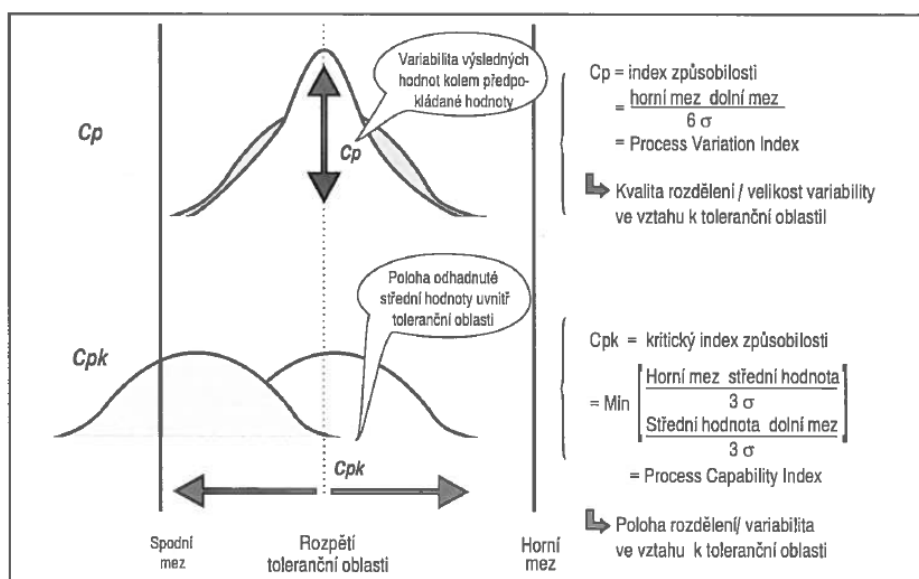
Tab. 3: Kritéria diagramu pro rozpětí [5]

Centrální přímka	$mR$	průměr z klouzavých rozpětí
UCL	$D_4R$	horní kontrolní limit
LCL	$D_3R$	dolní kontrolní limit

### 3.6.3 Index způsobilosti a kritický index způsobilosti

Kvalitu výrobního procesu jednoho komponentu můžeme určit dvěma jakostními měřítky. Jsou to index způsobilosti  $C_p$  a kritický index způsobilosti  $C_{pk}$ . Rozdělení a výpočet ilustruje obrázek 15.

Index způsobilosti přitom označuje principiální způsobilost procesu, dosahovat hodnoty s nižší variabilitou s ohledem na délku tolerančního intervalu. Stanovit lze tak, že se vypočítá variabilita reálných výsledných hodnot kolem předpokládané střední hodnoty normálního rozdělení.

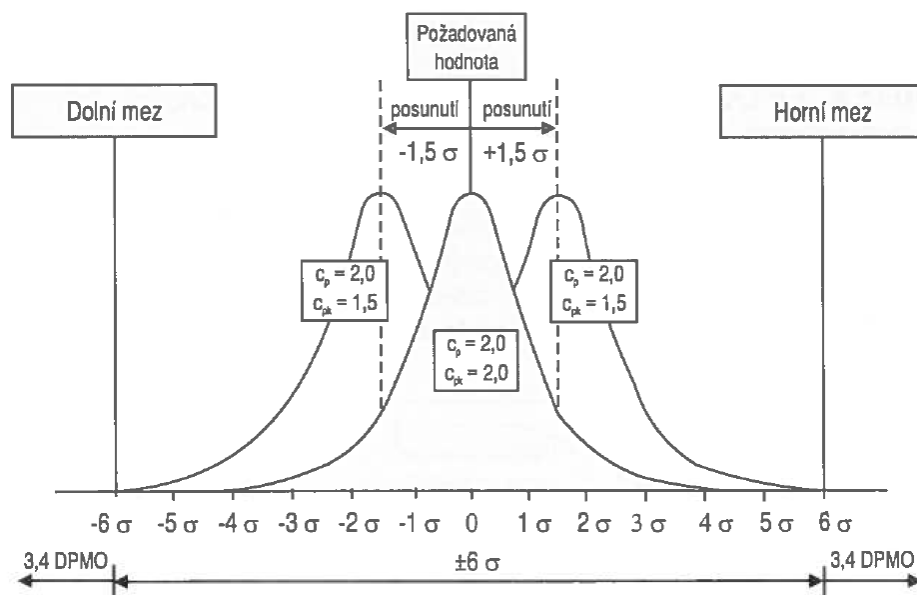


Obr. 15: Výpočet a rozdělení Cp, Cpk [6]

Kritický index způsobilosti zohledňuje navíc ještě polohu skutečných průměrných hodnot vypočítaných z naměřených hodnot ve vztahu k definované toleranční oblasti. Ve středu analýzy tedy stojí vzdálenost horní a dolní meze od střední hodnoty.

### 3.6.4 Statistický pohled

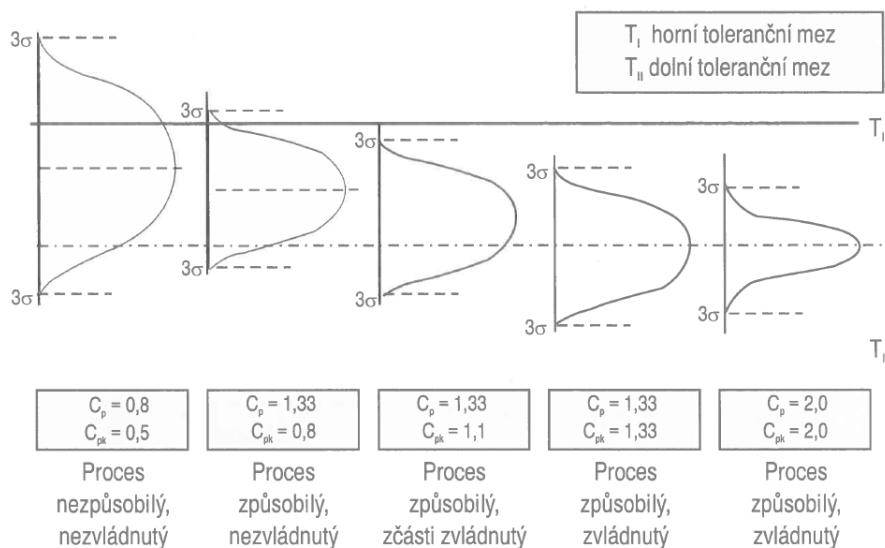
Stanovením míry variability a míry polohy respektive posunutí pro Six Sigma se převádí krátkodobá způsobilost procesu na dlouhodobou. Konkrétně to znamená, že při míře variability  $Cp = 2$  se výsledky procesu pohybují ve vztahu k tolerančnímu intervalu relativně blízko sebe. Jestliže je pro proces určen střed pomocí požadované hodnoty, zůstává sice  $Cp = 2$ , ale  $Cpk$  se snižuje na 1,5 a tím znázorňuje zhoršení. [6]



Obr. 16: Stanovení míry variability a posunutí procesu [6]

Pokud se shodují horní a dolní mez s odchylkou v rozmezí  $\pm 6\sigma$ , vykazuje hodnota  $C_{pk} = 1,5$  tolerovanou změnu polohy procesu. To má samozřejmě vliv na DPMO, který se zvyšuje na hodnotu 3,4 mimo horní a dolní mez. Protože takové posunutí se v praktickém využití dá očekávat, byla úroveň požadavků na kvalitu na úrovni nulových defektů o něco málo zmírněna, takže normální rozdělení s posunutím je vlastním měřítkem Six Sigma a na této úrovni kvality při oboustranné toleranci vždy vykazuje hodnotu DPMO 3,4, takže celkem 6,8 DPMO, jak je vidět na obrázku 16. Ve srovnání s tímto dosahuje rozdělení kolem požadované hodnoty vyšší Six Sigma úrovně, a to 0,002 DPMO. [6]

### 3.6.5 Stupně způsobilosti procesu



Obr. 17: Stupně způsobilosti procesu [6]

Proces v pravé části obrázku 17 má nejvyšší způsobilost a je tudíž dobře zvládnutý. Je přímo vycentrován podél požadované hodnoty a leží s hodnotou  $C_{pk} = 2$  nad úrovní požadovanou pro  $6\sigma$ . Proces v levé části obrázku není způsobilý a nebude již zvládnutelný. Hodnoty  $C_p$  a  $C_{pk}$  jsou tudíž nejnižší. Efektivní střední hodnota se znatelně odchyluje od požadované střední hodnoty, takže mnoho středních hodnot leží nad horní toleranční hranicí a tím mimo toleranční koridor. Zbýlá tři rozdělení ukazují, že oba levé procesy v tomto momentě nejsou zvládnuty, nebo jen omezeně, přestože proces je ještě relativně způsobilý. Problém částečně tkví ve větší variabilitě, tedy v nevynikajícím indexu způsobilosti. Z větší části ale vězí v naměřených hodnotách, protože skutečné střední hodnoty se značně odchylují od požadované hodnoty. Proces s hodnotou  $C_p$  i  $C_{pk}$  na úrovni 1,33 je zvládnutý a způsobilý, i když nevykazuje žádné zlepšení v indexu způsobilosti, ale vykazuje dobrý kritický index způsobilosti. [6]

### 3.7 Opakovatelnost systému měření - Gage R&R

Pro ujištění se, že rozdíly v naměřených hodnotách jsou opravdu důsledkem skutečných rozdílů v tom, co se měří a ne v důsledku variability měřicí metody. Je potřeba použít vyhodnocení opakovatelnosti a reprodukovatelnosti.

Opakovatelnost se vztahuje k vnitřní variabilitě měřicího systému. Je to variabilita, která se objevuje, když jsou prováděna následná měření za stejných podmínek:

- Stejný člověk
- Stejný měřený dílec
- Stejný měřený rozměr
- Stejně měřidlo
- Stejně nastavení
- Stejně podmínky okolí

Reprodukovatelnost je variabilitou v průměru měření provedeném různými operátory pomocí stejného měřidla při měření totožného rozměru u stejného dílce.

- Různý člověk
- Stejný měřený dílec
- Stejný měřený rozměr
- Stejně měřidlo
- Stejně nastavení
- Stejně podmínky okolí

### **3.8 Významnost vlivu procesních faktorů – Plánovaný experiment (DOE)**

Plánovaný experiment je jeden z nejsilnějších nástrojů k porozumění a omezení variability v jakémkoli procesu. DOE (Design of Experiment) je užitečný nástroj, kdykoli chceme v procesu:

- Nalézt optimální procesní nastavení, které vytváří nejlepší výsledky při nejnižších nákladech.
- Identifikovat a kvantifikovat faktory, které mají největší vliv na výstup.
- Identifikovat faktory, které nemají velký vliv na kvalitu, nebo čas.
- Rychle vyšetřit velký počet faktorů, pro určení jejich významnosti.
- Omezit čas a počet experimentů potřebných k testování vícenásobným faktorem.

Identifikování vstupních proměnných z diagramu SIPOC, nebo z procesní mapy. Všechny faktory musí být klasifikovány dle možností:

- Říditelný faktor (X) – je to faktor, se kterým lze manipulovat, aby se zajistil jeho účinek na výstupu.
- Konstantní (C) – procedury, které popisují, jak proces běží, a identifikují určité faktory, které budou drženy na konstantní hodnotě, sledovány a udržovány během experimentu.

- Faktor šumu (N) – faktor, který je neřiditelný, obtížně, nebo příliš nákladně řiditelný, nebo pokud možno neřízený. [5]

Faktory:

- Praktické – má smysl měnit úroveň faktoru.
- Přípustné – je možné z fyzikální podstaty faktor změnit.
- Měřitelné – můžeme měřit a opakovat úroveň nastavení.

### **3.8.1 DOE – plné faktoriální versus zkrácené faktoriální experimenty**

Plné faktoriální experimenty se někdy označují jako optimalizace návrhů, protože umožňují určit, která kombinace faktor a nastavení přinese nejlepší výsledek v rámci testovaného rozsahu. Plné testy jsou konzervativní, protože nemohou být určeny informace o všech hlavních účincích a proměnných. [6]

- Vyšetřují všechny možné kombinace úrovní faktorů.
- Umožňují určit hlavní účinky.
- Umožňují určit účinky, které budou mít interakci faktorů na odezvové proměnné.
- Mají možnost odhadnout úrovně k nastavení faktorů pro dosažení lepších výsledků.

Zkrácené faktoriální testy sledují pouze vybrané podmnožiny z možných kombinací obsažených v plném faktoriálním testu.

- Umožní zkontrolovat mnoho faktorů a oddělit významné od nevýznamných faktorů.
- Prostředky nutné k dokončení zkráceného faktoriálního plánu jsou únosné.

## **4 Experimentální část**

### **4.1 Cíle diplomové práce**

Předpověditelný proces nominálního (finálního) měření průtoku vzduchu na detailech plamence sestavy programu HTF7000 je hlavním cílem diplomové práce, který je reprezentován zvýšením indexů způsobilosti procesu  $cp$ ,  $cpk$  s cílem 1,33. Tato hodnota reprezentuje proces ve stavu  $3\sigma$ .

Eliminovat extrémní body (nenadálé události) a najít kořenovou příčinu.

Navrhnout a vyvinout kontrolní plán pro minimalizování variace v průběhu měření průtoku vzduchu.

### **4.2 Aktuální stav**

Měření průtoku vzduchu na sestavě plamence programu HTF7000 má dle SPC (statistická regulace procesu) průměrnou hodnotu  $cp$  0,55 a  $cpk$  0,26 (Únor 2013).

Měření průtoku vzduchu není předpověditelný ani stabilní proces.

Zajištěním lepší kontroly procesu dosáhne společnost Honeywell snížení nákladů na nejakost (COPQ), které byly stanoveny na \$49 000 pro rok 2013 a s očekávaným nárůstem výroby by v roce 2014 měli dosáhnout hodnoty až \$57 000.



## 5 DMAIC

Tento projekt má ve fázi Definovat obsaženy dva nástroje – Myšlenková mapa (Thought Map) a SIPOC. Tato část se zaměřila na stanovení problému a cíle projektu. Základní otázka zní: „Můžeme vyrábět přesněji?“. Následuje přesné definování zaměření projektu na konkrétní produkt, respektive dílce. Projekt tedy řeší detaily sestavy plamence programu HTF7000, kterými jsou vnitřní a vnější panel a panel dómu.

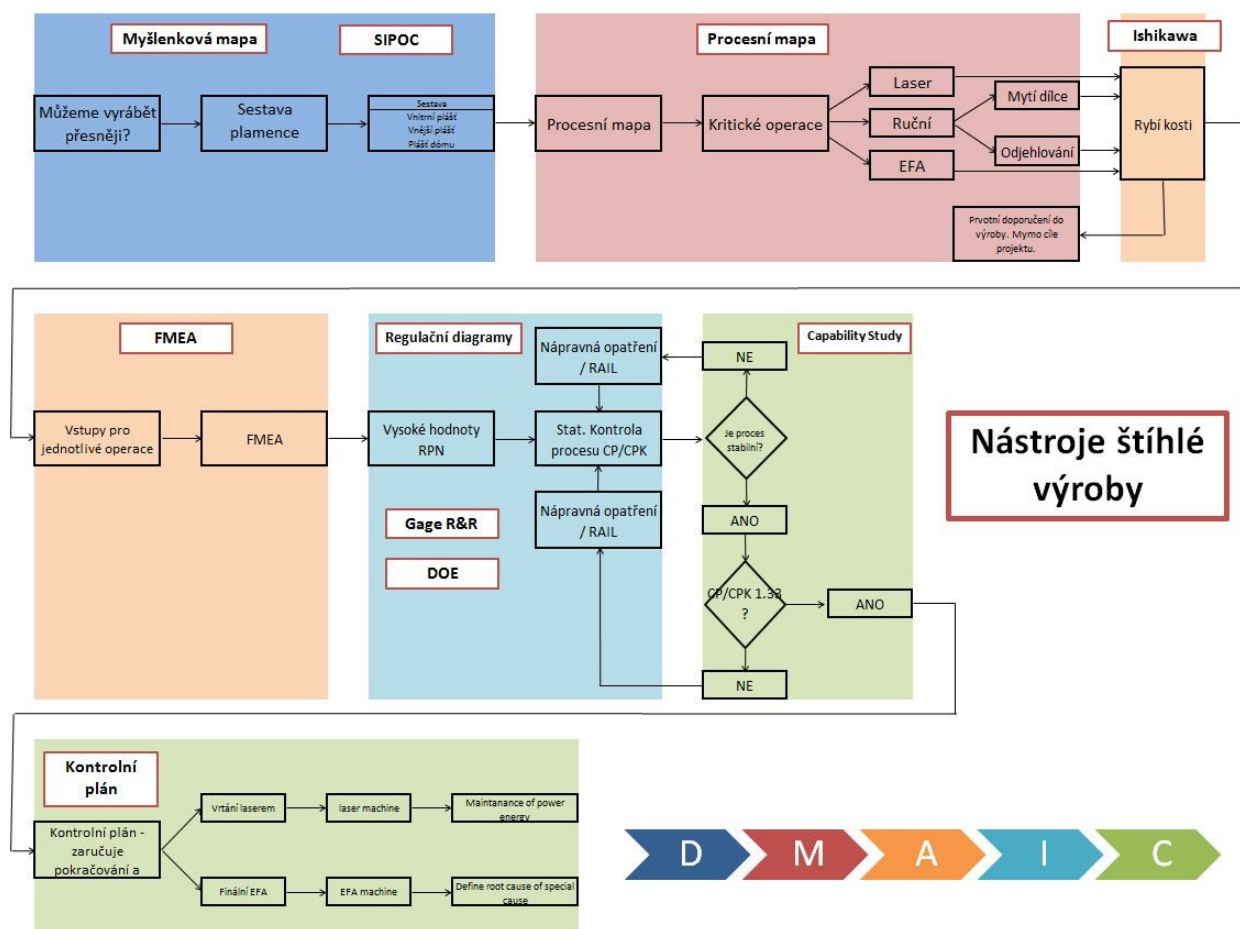
Další fáze Měřit se zabývá důkladným porozuměním současného stavu procesu a má za úkol sesbírat spolehlivá data ohledně rychlosti procesu, nákladů a kvality, které se využijí k odhalení zásadních příčin problémů. Tento krok obsahuje nástroj Procesní mapa, ze které se vyvodily operace kritické pro kvalitu, tzv. CTQ (Critical To Quality).

Vstupy a výstupy z operací označených jako kritické pro kvalitu dále slouží ve fázi Analyzovat. V této fázi se použily dva nástroje a to Rybí kost pro detailní rozbor vstupů do operací a následně analýzu FMEA (Failure Modes and Effects Analysis – Analýza druhů a účinků vad), pomocí které se identifikovali konkrétně způsoby, jakými může proces selhat.

Následující fáze struktury DMAIC je Zlepšit, ve které se využilo dalších tří nástrojů. Kontrolní grafy, analýza opakovatelnosti a reprodukovatelnosti Gage RR a plánovaný experiment DOE. Cílem je plně zavést dříve definovaná řešení. Do těchto analýz vstupují podněty s vysokým ohodnocením z nástroje FMEA. Následně probíhá kontrola způsobilosti procesu, ve kterém je požadováno dosažení hodnot tří sigma, či dosažení indexu způsobilosti 1,33.

Poslední fáze Řídit se zaměřuje na dokončení práce na projektu a odevzdání zlepšeného procesu jeho vlastníkově. Tento poslední krok obsahuje dva nástroje výpočet způsobilosti procesu a kontrolní plán, který přesune úkoly na vlastníka procesu.

Mapa projektu dle rozdělení DMAIC je zobrazena na obrázku 18.



Obr. 18: Mapa projektu dle DMAIC

## 5.1 Definovat

### 5.1.1 Myšlenková mapa

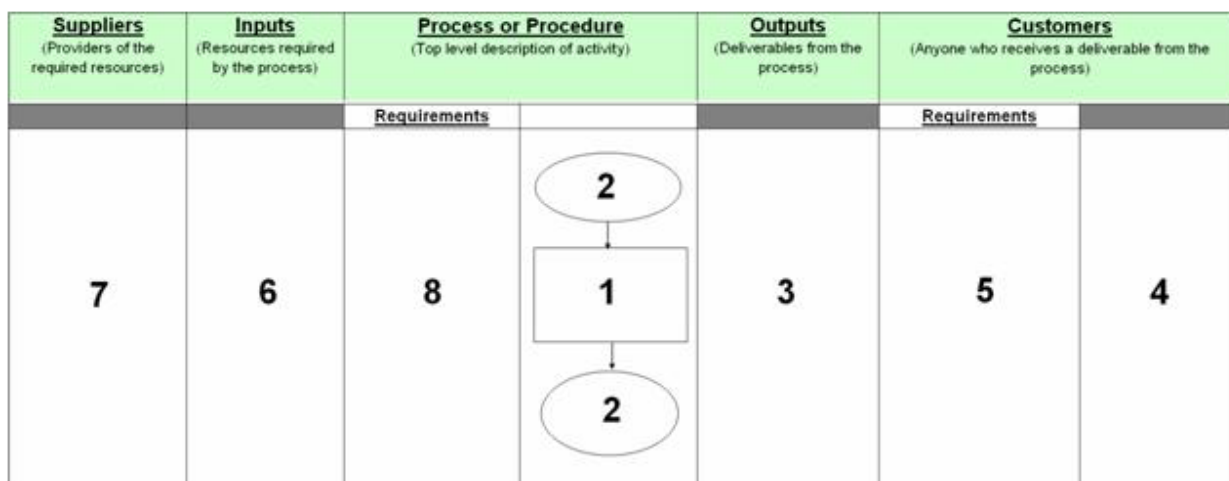
Jako první nástroj se v projektu použila myšlenková mapu (Obr.19) k organizování myšlenek s ohledem na to, co se vím a co nevím o projektu a vypracovat plán akcí, které pomohou posunout se dále v projektu. Myšlenková mapa se téměř jako jediný nástroj v projektu neustále aktualizoval, aby byl zřetelný cíl projektu a bylo jasné, v jaké fázi se projekt právě nachází a co je ještě potřeba udělat. Myšlenková mapa sloužila jako nástroj na sběr myšlenek a jejich viditelné utřídění. Zároveň jako záznam, nebo historie celého projektu.



Obr. 19: Myšlenková mapa

### 5.1.2 SIPOC

Diagram SIPOC se ověřil, zda procesní vstupy odpovídají výstupům předcházejícího procesu a vstupům, nebo očekáváním následujícího procesu. Zachycuje informace zásadní pro projekt. Nástroj SIPOC umožnil dohodnout se s vlastníky procesů na hranicích projektu a jeho rozsahu. [13]



Obr. 20: Postupné kroky při tvorbě SIPOC [13]

Na ilustraci Obr.20 jsou znázorněny a očíslovány kroky, kterými se postupuje při sestavování diagramu SIPOC.

1. Identifikace hranic procesu a klíčové činnosti (1,2). Doporučuje se držet pohled na vysoké úrovni s maximálně šesti činnostmi. V projektu se jako klíčové činnosti označili

vrtní a odjehlování chladících otvorů a měření jejich průtočné plochy. Hranice procesu jsou nevyvrtaná podsestava a finální sestava se změřenou hodnotou průtočné plochy.

2. Dalším krokem bylo zjištění klíčových výstupů z procesu a určit, kdo je zákazníkem těchto výstupů (3,4). Následně bylo potřeba zjistit, co je požadavkem zákazníka (5). Příklad výstup z procesu „průměr chladících děr“ má za zákazníka operátora (odpovědná osoba) a oddělení kvality (odpovědné oddělení). Požadavky těchto zákazníků jsou definovány na výkrese dílce a musejí být vyrobeny v jeho toleranci.
3. Identifikace vstupů a dodavatele (6,7). Vstupů do procesu může být více, ale stejně jako u výstupů se musíme zaměřit na hlavní a klíčové vstupy. U těchto vstupů je následně potřeba určit jaké jsou jejich požadavky (8). Uvedu příklad. Do procesu, konkrétně do procesu vrtní, vstupují válečkové trny (kalibry) na kontrolu průměru otvorů. Dodavatelem těchto trnů je metrologie a požadavkem je jejich kontrola, čili kalibrace.

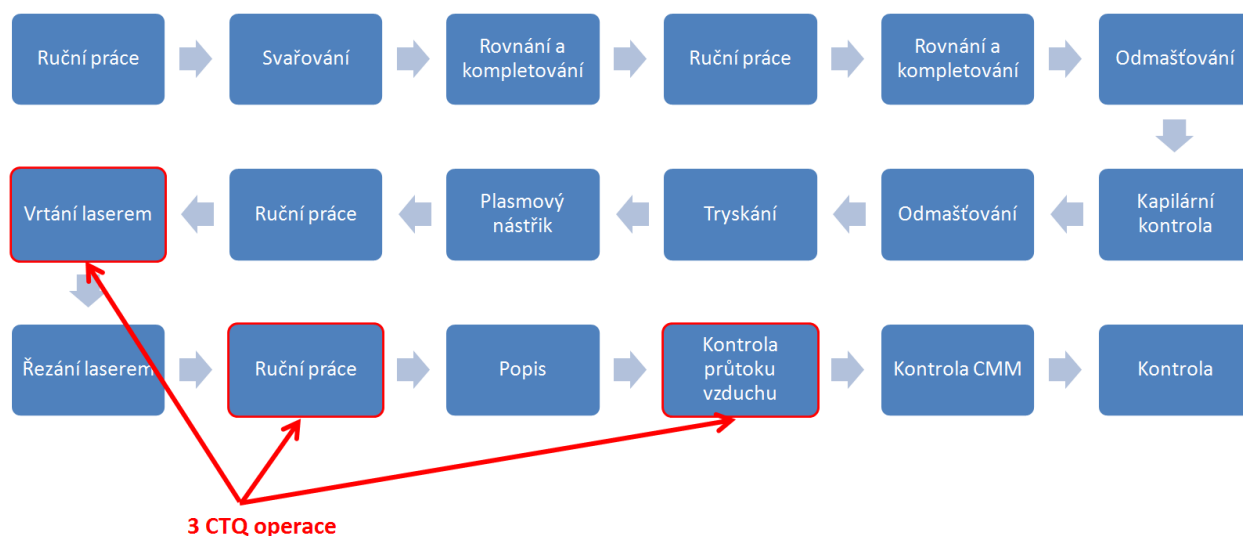
Suppliers (Providers of the required resources)	Inputs (Resources required by the process)	Process (Top level description of activity)		Outputs (Deliverables from the process)	Customers (Anyone who receives a deliverable from the process)	
		Requirements			Requirements	
Metrologie Dodavatel / Údržba Nadřízený / Parták	Válečkové trny Zařízení laser Operátor laseru	Kalibrace Údržba Školení	<div>Podsestava</div> <div>↓</div> <div>Vrtání a odjehlování chladících otvorů a měření jejich průtočné plochy.</div> <div>↓</div> <div>Finální sestava</div>	Průměr chladících děr	Ve výkresové toleranci	Operátor Oddělení kvality
Dodavatel Nadřízený / Parták	Zařízení na kontrolu EFA Operátor laseru	Kalibrace / Údržba Školení		Průběžná EFA CP 0,55 CPK 0,26	Ve výkresové toleranci CP, CPK 1,33	Operátor
Dodavatel Nadřízený / Parták	Odjehlovací nástroje Brusíc	Funkční Školení		Deburred part	Ve výkresové toleranci	Oddělení kvality
Dodavatel Nadřízený / Parták Konstrukce	Zařízení na kontrolu EFA Kontrolor EFA Výkresová tolerance	Kalibrace / Údržba Školení Výrobitelnost		Finální EFA CP 0,55 CPK 0,26	Výkonostní sáblitu CP, CPK 1,33	Výrobce letadel
Dodavatel Nadřízený / Parták Výrobní proces	Zařízení Operátor Dílce mimo toleranci	Kalibrace / Údržba Školení Žádné		COPQ \$35k	COPQ < 50%	Oddělení kvality

Obr. 21: SIPOC projektu

Obrázek 21 zobrazuje finální podobu SIPOC nástroje se, kde je definován hlavní proces, spolu s hranicemi projektu.

## 5.2 Měřit

V další DMAIC fázi projektu Měřit, se z technologického postupu určilo, které operace jsou klíčové a z pohledu kvality i kritické. Jednalo se o operace vrtní laserem, ruční práce (zabrušování) a kontrola průtočné plochy vzduchu.



Obr. 22: Sled operací podsestavy plamence

U těchto operací se sestavila Procesní mapa, která definuje kroky v procesu, které byly při formulaci problému vybrány ke zlepšení.

### 5.2.1 Procesní mapa

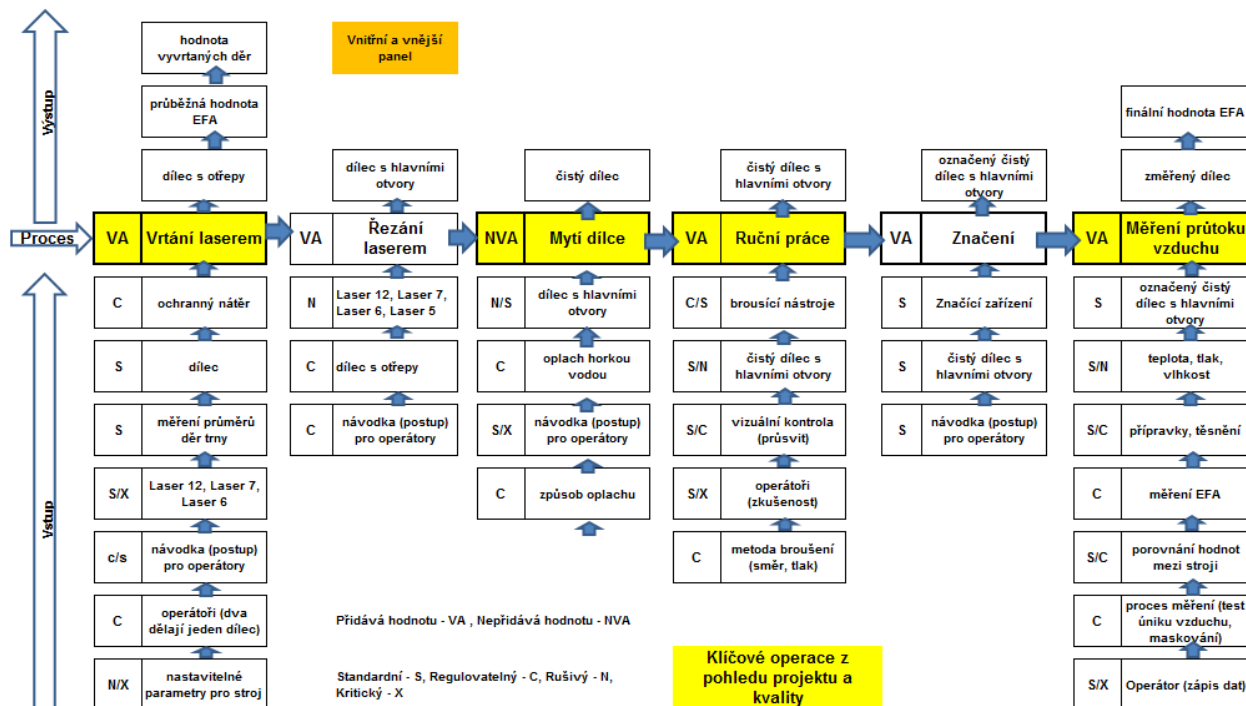
První krok při tvorbě procesní mapy je identifikovat všechny činnosti, které se konají v rámci hranic stanovených v nástroji SIPOC. V tomto případě byly činnosti identifikovány již dříve ze sledu operací a bylo určeno, které procesy jsou pro projekt zajímavé a na které má zaměřit. Procesní mapa však musí reflektovat aktuální proces a ne jen výběr operací, které jsou z jeho pohledu zajímavé a důležité. Musely se tedy do procesní mapy zahrnout i operace, či procesy, které se nacházejí ve sledu operací mezi nimi a analyzovat tak ucelenou část výrobního procesu.

Jako druhý krok se přidávají výstupy z operací. V některých případech jsou výstupy dány procesem a nejsou záměrně vyráběny, v jiných případech ne. Proces se dokumentoval tak jak je a zahrnul všechny výstupy.

Stejně jako u vstupů z operací se projekt věnoval jednotlivě i vstupům do každé operace. Procesní mapa na obrázku 23 pomocí rozdělení dle 6M se identifikoval každý vstup. Jako vstupy do operací jsou samozřejmě označeny i výstupy z operací předešlých.

V dalším bodě tvorby procesní mapy se kategorizovaly jednotlivé vstupy jako regulovatelné, označené písmenem C, standardní operační postup jako S, rušivý, nebo šum jako N a kritické vstupy označené jako X.

Posledním bodem při tvorbě procesní mapy je identifikovat každý krok (operaci), jestli hodnotu přidává, nebo naopak nepřidává. Toto rozdělení se nejčastěji pozná, pokud dokážeme odpovědět, zda daná operace změní produkt v požadovaném záměru a zda zákazník tuto změnu požaduje. Například operace vrtání laserem hodnotu přidává, protože zákazník (požadavek výkresu) požaduje na dílci dané otvory, ale naopak operace mytí dílce hodnotu nepřidává. Samozřejmě, že zákazník si nepřeje, aby mu byl doručen špinavý dílec, ale už neurčuje, jestli se bude v průběhu výroby umývat jednou, nebo třikrát. V tomto případě se jednalo o průběžné umytí dílce, které nevyžaduje zákazník, ale následující výrobní proces.



Obr. 23: Procesní mapa

## 5.3 Analyzovat

### 5.3.1 Rybí kost

Nástroj Rybí kost, neboli Ishikawovův diagram, se sestavil v závislosti na rozdělení dle 6M – Metoda, Člověk, Stroj, Měření, Příroda a Materiál, viz obrázek 24. Tento nástroj se v práci použil souběžně s Procesní mapou. Využil se jako generátor vstupů do procesů dle dané operace.

Jak bylo zmíněno, dle rozdělení 6M se pro jednotlivé operace odpovědělo na otázku, co všechno přispívá a umožňuje zhoršit proces, jehož výsledkem je nízká úroveň způsobilosti

procesu při měření průtočné plochy. Tento diagram však neslouží k tvorbě akcí nápravných opatření. Všechny tyto nálezy musí nejdříve být označeny za kořenovou příčinu.

### Rybí kost operace laser

V kategorii matka příroda byly v operaci laser přiřazeny vlivy jako změna napětí v elektrické síti, výpadky proudu způsobené bouřkou, zvýšenou vlhkost způsobenou deštěm, vliv času a potřebou práci na směny, nebo únavu.

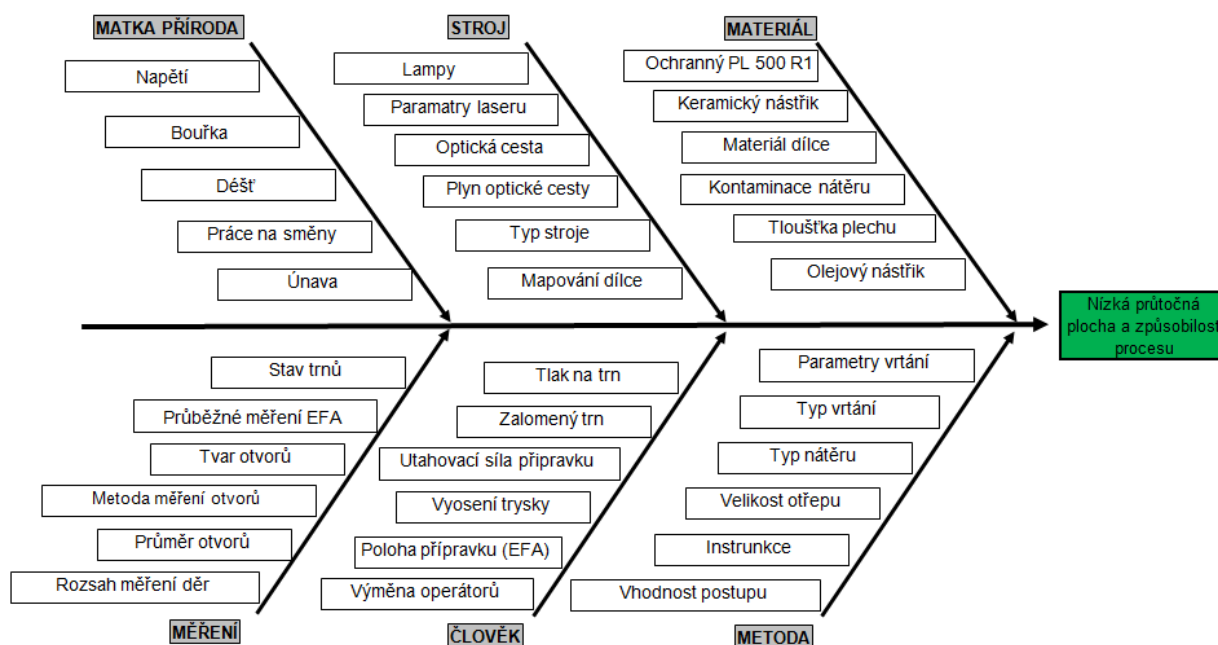
Zařízení se může podílet na zhoršení procesu vlivem špatného stavu lampy, zadaných parametrů, neseřízenou optickou cestou, asistenční plyn optické cesty, typ stroje a mapování dílce, což je zjištění kontury dílce před samotným vrtáním.

Materiál ovlivňuje proces například použitým keramickým nástřikem na dílci, nebo samotné materiálové složení plechu, ochranný nátěr a jeho kontaminace, tloušťka základního materiálu a v neposlední řadě olejový nástřik pro zajištění nepřilnavosti otřepů na dílci.

Vliv měření způsobuje stav kontrolních trnů, průběžné měření průtočné plochy vzduchu, tvar vrtaných otvorů, metoda měření otvorů, průměr děr a rozsah měření děr, jestli se měří jen pár děr v řadě, nebo jestli se provádí 100% kontrola.

Člověk ovlivňuje operaci vrtání laserem tlakem na kontrolní trny, zalomením trnu, jakou použije utahovací sílu v přípravku, jestli je dílec vyosení dílce na měřícím zařízení, poloha trysky, či střídání operátorů na směnách.

Vliv metody umocňují parametry vrtání, typ vrtání, typ ochranného nátěru, velikost otřepu, instrukce pro operátora a vhodnost pracovního a výrobního postupu.



Obr. 24: Rybí kost operace laser

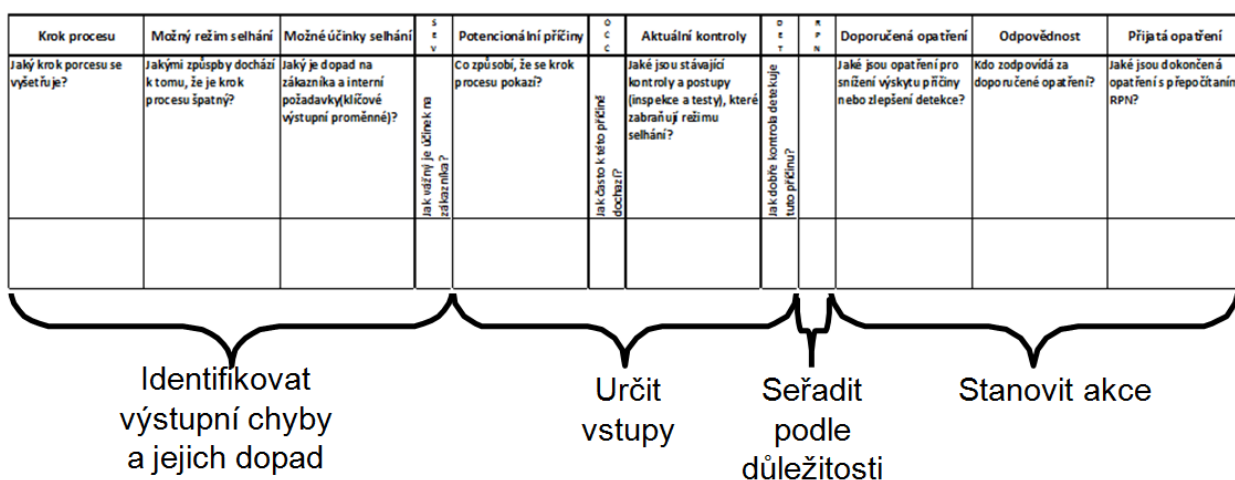


### 5.3.2 FMEA

Je to strukturovaný přístup k identifikování cest, ve kterých produkt, nebo proces může selhat. Zároveň vede k odhadnutí rizik určité příčiny s ohledem na zmíněná selhání. Stanoví priority pro akce, které by měly být přijaty ke snížení možnosti výskytu selhání. Dále ohodnotí správnost návrhu, nebo stávajícího kontrolního plánu k předcházení chyb. Obrázek 25 popisuje obsahovou část diagramu FMEA.

Smysl:

- Identifikace možného selhání a ohodnocení vážnosti jejich účinků
- Seřazení možných chyb
- Pomoc k zaměření se na prevenci vzniku chyby



Obr. 25: Rozdělení obsahu diagramu FMEA [13]

Definice - Významnost, Výskyt, Odhalitelnost

- Významnost (vady) – důležitost dopad na požadavky zákazníka (1 = lehké následky, 10 = těžké následky)
- Četnost (příčiny) – frekvence, se kterou se příčina přihodí a způsobí vadu (1 = nízká pravděpodobnost, 10 = vysoká pravděpodobnost)
- Odhalitelnost (způsobilost současného způsobu řízení) – schopnost současného způsobu řízení detekovat příčiny před vytvořením vady a vady před způsobením selhání (1 = lehce odhalitelné, 10 = těžce odhalitelné)

V postupu při tvorbě FMEA se hodnotila jednotlivá rizika dle expertní znalosti daného procesu ve spolupráci s vlastníky procesů.

Výstupem z FMEA je číslo RPN (Risk Priority Number), čili míra rizika. RPN je číslo vypočteno na základě vstupních informací týkající se potencionálního způsobu porušení, účinku a schopnosti procesu odhalit poruchy, před tím, než se dostanou k zákazníkovi. Je



vypočteno součinem tří hodnot Významnost, Výskyt a Odhalitelnost. RPN čísla jsou seřazena od nejvyšší po nejnižší a jsou doporučena nápravná opatření pro nejvyšší z nich.

Process Step	Potential failure mode	Potential failure Effects	S E V	Potential causes	O C	Current Controls	D E T	R P N	Actions Recommended	Plans / Responsibility
Krok procesu	Možný režim selhání	Možné účinky selhání		Potencionální příčiny		Aktuální kontroly			Doporučená opatření	Odpovědnost
LASER	Malý průměr děr	Nevyhovující hodnota EFA	10	Kvalita laserového svazku	8	Pracovník údržby - nůstřel do fotocitlivého papíru	7	560	Kontrola pomocí Shack Hartman sensoru	Oddělení údržby
RUČNÍ BROUŠENÍ	Ucpané díry	Hodnota EFA pod úrovní výkresové tolerance	7	Velké otřepy vznikající při zabrušování dílce (ucpou otvor)	10	N/A	7	490	Statistická kontrola procesu	Oddělení technologie laser
LASER	Malý průměr děr	Nevyhovující hodnota EFA	10	Optická cesta	6	Preventivní údržba (TPM)	7	420	Opakovaná kontrola	Oddělení údržby
LASER	Malý průměr děr	Nevyhovující hodnota EFA	10	Opatřené trny od používání	5	1/2 rok kalibrace	8	400	Kontrola trnů před každou operací, TPM	Technolog laseru
LASER	Nedostatečná ochrana dílce nátěrem	Výprsky materiálu tvoří velké otřepy	7	Tenká vrstva ochranného nátěru	8	Vizuální kontrola	7	392	Zvýšit počet vrstev ochranného nátěru na dílci	Technolog laseru
RUČNÍ BROUŠENÍ	Ucpané díry otřepy	Hodnota EFA pod úrovní výkresové tolerance	7	Špatná volba brousících nástrojů (rychlost a směr broušení, průměr a typ brusného kotouče)	5	N/A	10	350	Vývoj brousící metody	Technolog dílce
EFA	Špatně změřená hodnota EFA	Dokončený nevyhovující dílec	10	Zaschlý mapovací nástřik na dílci	8	Vizuelní kontrola	4	320	Přidání postupu (profouknout dílce stlačeným vzduchem)	Technolog kontroly průtoku dílce

Obr. 26: FMEA

Z obrázku 26 je zřejmé, že čtyři z pěti nejvyšších hodnot RPN se týkají procesu vrtání laserem. Jako nejvyšší riziko vyšel s hodnotou 560 možný režim selhání v podobě malého průměru děr, způsobeného kvalitou laserového svazku. Aktuální kontrola nástřelem paprsku do fotocitlivého papíru není dostatečná. Návrh na řešení toho možného režimu selhání je kontrola pomocí Shack Harmanova senzoru, který detailně určí aktuální stav a vlastnosti laserového svazku.

Druhé nejvyšší riziko možného účinku selhání představuje hodnota naměřené průtočné plochy vzduchu pod úrovní výkresové tolerance, která je způsobena ucpánými dírami. Jako potencionální příčinu jsem určil velké otřepy, které vznikají při zabrušování dílce a následně vlivem pohybu brusného kotouče ucpou otvor. Jako doporučené opatření, nebo spíše nástroj jak tuto událost sledovat, byla zvolena statistická kontrola procesu, kde bude možné porovnat rozdíly mezi naměřenou hodnotou průtočné plochy vzduchu po vrtání laserem a následně po zabroušení. Tyto dvě hodnoty porovnat a určit, zda byl dílec špatně změřen po vrtání laser, nebo jestli za nevyhovující hodnotu průtoku vzduchu můžeme operace broušení. Pokud vyjde hodnota pod úrovní výkresové tolerance, znamená to, že otvory v dílci jsou menší a dají se tak ještě převrtat a opravit.

Třetí nejvyšší riziko možného účinku selhání je nevyhovující hodnota naměřené průtočné plochy a to v obou směrech tolerančního pole dílce. Tedy když vyjde hodnota průtočné plochy vyšší, nebo nižší oproti požadavku výkresu. Možný režim selhání je v tomto případě malé, nebo naopak velké průměry děr a potencionální příčinou je stav optické cesty laserového paprsku stroje. Aktuální kontrola TPM (Total Preventive Maintenance) zařízení laseru jako celku, byla doplněna ještě o opakovanou kontrolu stavu optické cesty s cílem nastavit nový standard v údržbě tohoto parametru.

Jako čtvrté nejvyšší riziko možného účinku selhání je opět nevyhovující hodnota naměřené průtočné plochy pod úrovní výkresové tolerance. Možný režim selhání je malý průměr děr. Potencionální příčina je opotřebení kontrolní válečkových trnů. Aktuální kontrola stanovovala půlroční kalibraci těchto kontrolních měřidel. Jako doporučené opatření jsem stanovil kontrolu stavu a průměrů kalibrů mikrometrem před každou další operací. Zároveň bylo toto doporučení, následně nařízení, přidáno do postupu ke každému dílci.

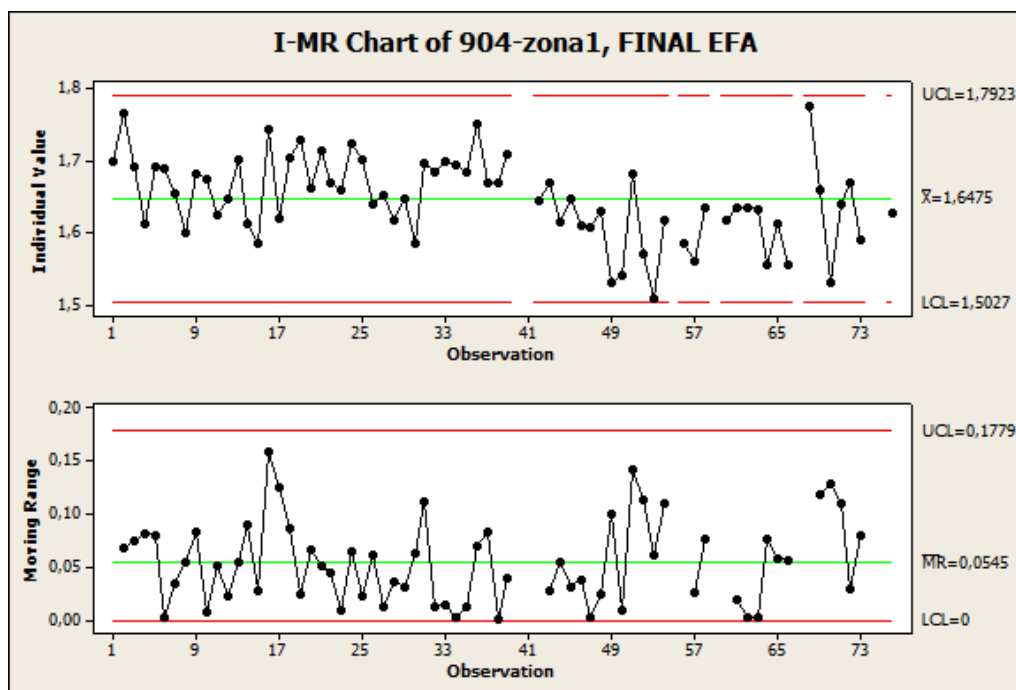
Páté nejvyšší riziko možného účinku selhání je tvorba větších otřepů na okraji děr v průběhu vrtání laserem. Jako možnou příčinou selhání je špatná, nebo nedostatečná ochrana dílce ochranným nátěrem, který zabraňuje ulpívání výprsků kovu na povrchu dílce. Jako potencionální příčina je označena tenká vrstva ochranného nátěru a aktuální kontrola je pouze vizuální. Doporučené opatření zvýšit počet vrstev ochranného nátěru by mělo zajistit předcházení vzniku tohoto problému.

## **5.4 Zlepšení**

Fáze struktury DMAIC je Zlepšit. Jak již bylo uvedeno výše v textu, jedná se o fázi, ve které se využilo dalších tří nástrojů. Kontrolní grafy, analýza opakovatelnosti a reprodukovatelnosti Gage RR a plánovaný experiment DOE. Cílem je plně zavést dříve definovaná řešení.

### **5.4.1 Regulační diagramy**

Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole datový diagram (I Chart) zachycuje změny průměrné hodnoty procesu a graficky znázorňuje dlouhodobou variabilitu, pomocí individuálních hodnot a Diagram pro rozpětí (Moving Range Chart) zobrazuje krátkodobou variabilitu, pomocí klouzavých rozpětí.



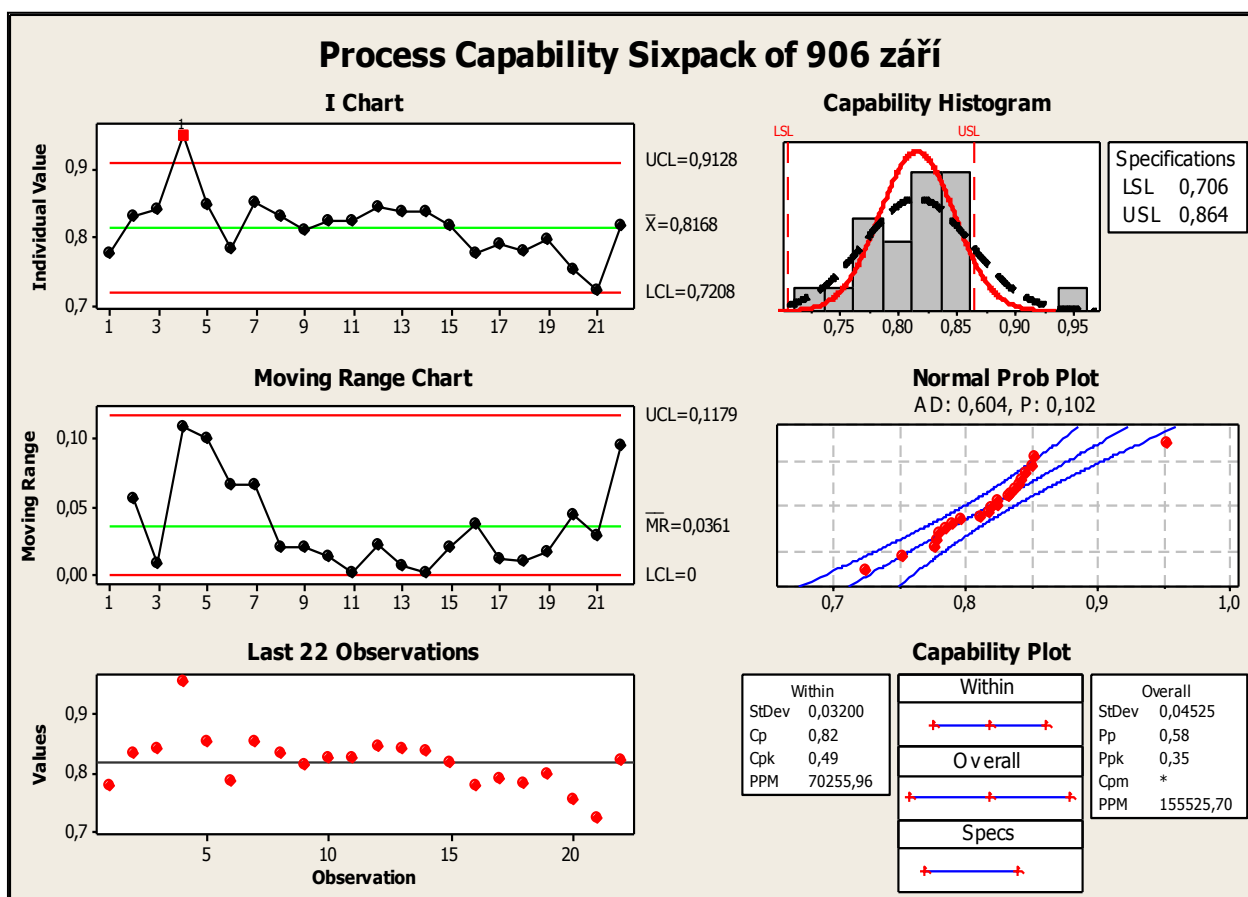
Obr. 27: Diagram individuálních hodnot a klouzavých napětí [17]

Obrázek 27 zobrazuje diagram individuálních hodnot a klouzavých napětí. Každý bod v grafu reprezentuje výsledek měření individuálního kusu. Oba grafy jsou vymezeny  $\pm 3$  směrodatnými odchylkami. Centrální příčka u Datového diagramu určuje průměr datových bodů a u diagramu pro rozpětí určuje průměr z klouzavých napětí.

Diagramy individuálních hodnot a klouzavých napětí (I-mR diagramy) znázorňují aktuální stav procesu na vnitřním panelu sestavy. Grafy nevykazují žádné výrazné trendy a ani jiné pro projekt podstatné odchylky. Data jsou rozložená rovnoměrně a nedochází ke zjevnému posunu střední hodnoty a ani neukazují systematické vlivy na proces.

#### 5.4.2 Náhodná variabilita

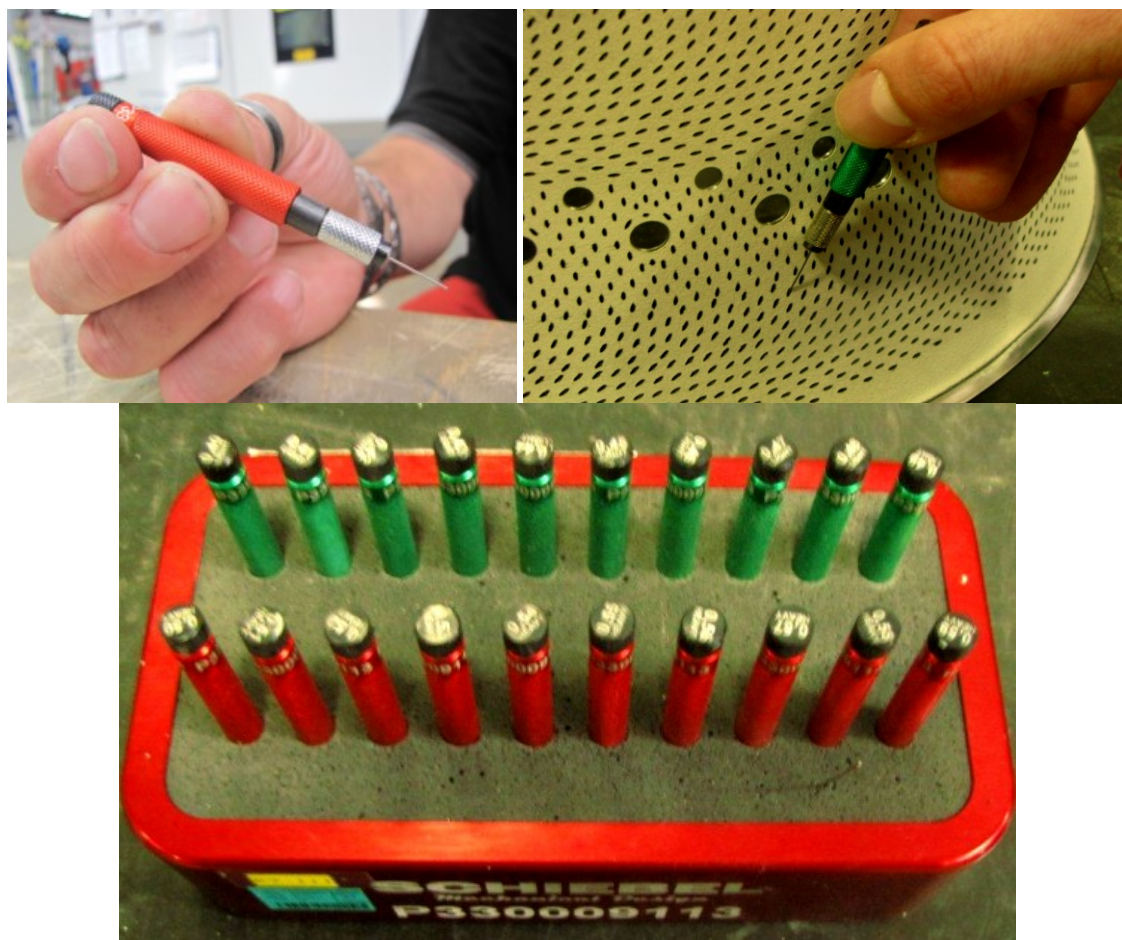
Při prozkoumání dat krátkého pozorování procesu, byla zjištěna náhodná variabilita u panelu dómu sestavy. Tato variabilita se projevovala vymezením se mimo rozsah horního kontrolního limitu. Při podrobnějším přezkoumání historie procesu a záznamů kvality se došlo k závěru, že tuto náhodnou variabilitu způsobila chyba operátora, který při průběžné kontrole průměrů prostřelovaných děr použil trnový kalibr se špatným průměrem a v operaci vrtání laserem tak pokračoval se špatně zjištěnou hodnotou, což v důsledku způsobilo vyšší naměřenou průtokovou plochu dílce, než je požadavek výkresu.



Obr. 28: Diagramy pro určení náhodné variability [17]

Komplexní seskupení grafů na obrázku 28 obsahuje diagramy individuálních hodnot a klouzavých napětí, graf časové řady, který je použitelný při požití vyššího objemu dat. V tomto případě pouze reflektuje situaci z diagramu individuálních hodnot. Dále je do seskupení zahrnut histogram normality dat, normální rozdělení pravděpodobnosti a sumarizaci způsobilosti procesu.

Aby se předešlo v budoucnu stejné chybě, byly vyrobeny trny s vlastním držákem a popisem daného průměru trnu. Nahradily tak stávající klasické sady trnů v úložném boxu s popisem, které vyžadovaly příkladnou kázeň od operátorů, aby nedocházelo k jejich zaměnění.



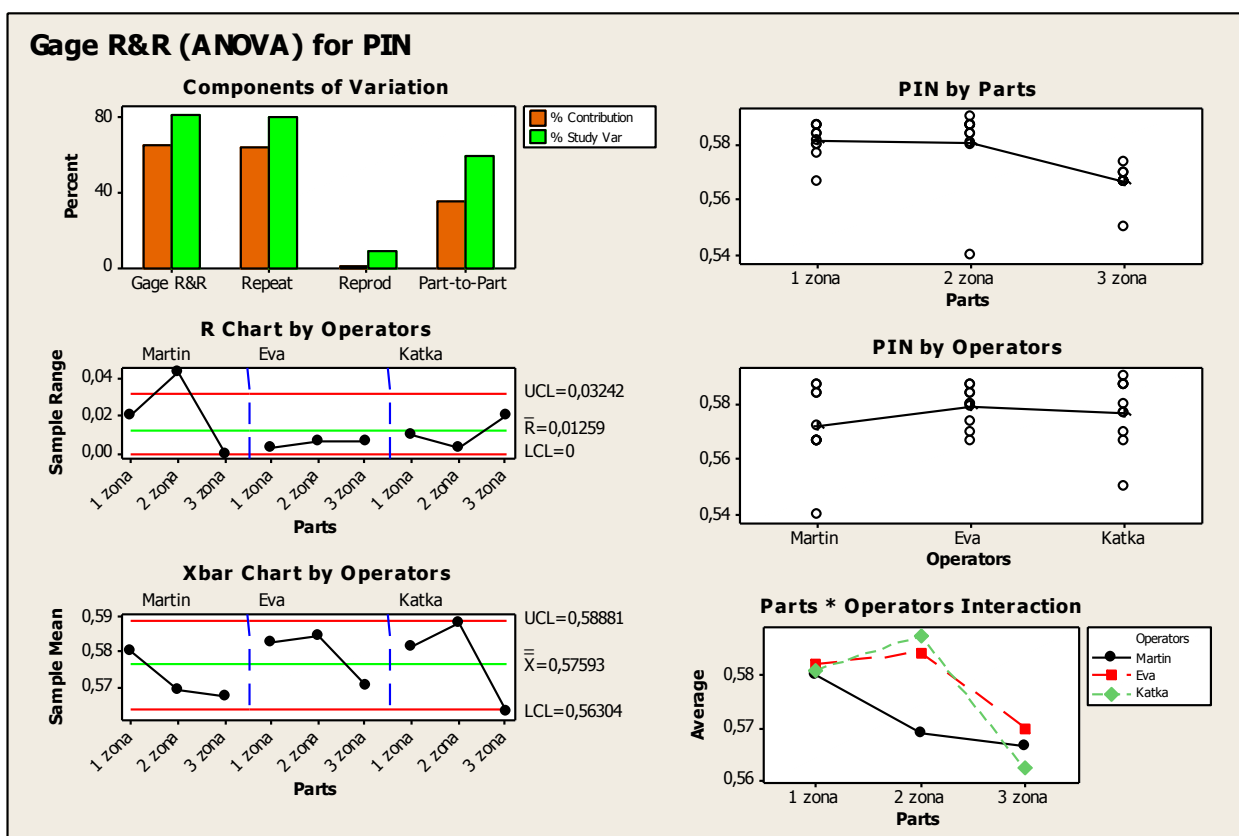
Obr. 29: Sada nových trnů

Nové trny, na obrázku 29 s vlastním držákem jsou navíc vybaveny vnitřním pružinovým systémem, který má zajišťovat jejich použití pouze pro správný průměr otvoru. Zamezí se tak tzv. "prorvání" trnu skrz otvor menšího průměru než je trn, což způsobuje jeho dřívější opotřebení hlavně nesprávné určení průměru otvoru.

#### 5.4.3 Test opakovatelnosti systému měření pomocí trnů - Gage R&R

Pro test opakovatelnosti systému měření efúzních otvorů kontrolními trny, Gage R&R, byly definovány vstupní podmínky pro tři místa pláště plamence, kde se v každé řadě provedly 3 odběry dat. Měření prováděli tři operátoři a měření mělo 3 opakování.

Variace testu Gage R&R byla náhodně generována softwarem Minitab a pomocí tohoto softwaru byl také test vyhodnocen a zpracován.



Obr. 30: Soubor diagramů testu Gage R&R [17]

Obrázek 30 zobrazuje soubor šesti diagramů testu Gage R&R - Příspěvky variability (Components of Variation), Regulační opakovatelnosti a reprodukovatelnosti, Graf podle vzorků a operátora, Graf interakce mezi operátorem a vzorkem.

V grafu Příspěvky variability (Components of Variation) jsou zmíněny 4 složky variace, které jsou rozděleny na 2 podskupiny a to procentuální příspěvek procesu (Contribution) oranžovou barvou a procentuálně vyjádřená variabilita studie (Study Var) zeleně.

První složka variace Gage R&R určuje opakovatelnost, tedy jak je pravděpodobné, že stejný člověk pomocí stejné metody obdrží stejné výsledky měření a dále určuje reprodukovatelnost, jak je pravděpodobné, že rozdílní lidé pomocí stejné metody a měřidel naměří stejné hodnoty. Gage R&R tedy měří variabilitu v odezvě očištěnou od variability způsobené rozdíly v měřených vzorcích. Bere do úvahy variabilitu způsobenou měřidlem, operátory a interakcí operátora se vzorkem. Hodnota vyšší než 30% je neakceptovatelný. Výsledek kolem 80% tedy ukazuje, že měřicí systém je příliš nepředvídatelný.

Opakovatelnost, jinak řečeno chyba měřidla, kterou získal jedním měřidlem (konkrétním trnem) jeden operátor při opakovaném měření vyšla opět okolo hodnoty 80% a je tedy neakceptovatelná. Reprodukovatelnost variability průměru měření, která vznikla, když různí operátoři měřili stejným měřidlem (trnem). Chyba mezi operátory vyšla výrazně méně a



to přibližně 11%. Variability mezi měřenými vzorky vyšla nižší než variabilita měřicího systému.

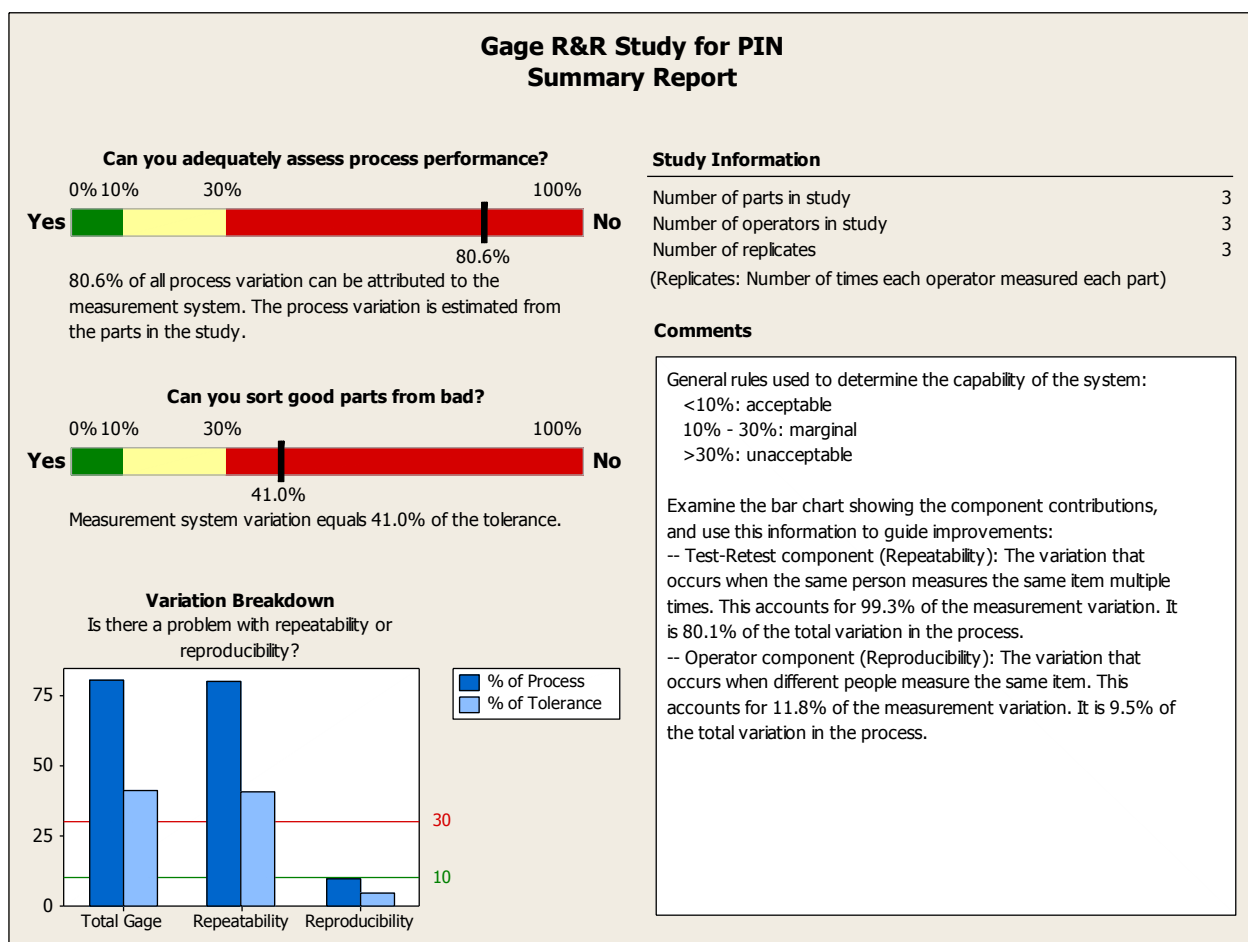
Opakovatelnost je kontrolována použitím grafu rozpětí Gage R&R regulačních diagramů (R Chart by Operators). Tento graf znázorňuje variabilitu měření u každého operátora a každé měřené oblasti. Z tohoto grafu je patrné, že operátor Martin udělat při měření druhé oblasti chybu a jeho hodnota je nad hranicí horního kontrolního limitu.

Reprodukovatelnost (Xbar Chart by Operators) lze interpretovat jako hledání významných rozdílů mezi měřeními vytvořenými různými operátory při měření stejných vzorků. Výsledky všech tří operátorů se drží mezi horním a dolním kontrolním limitem, což je u tohoto nástroje špatně. Naznačuje to tedy, že variabilita měřidla je mnohem větší, než variabilita mezi jednotlivými oblastmi měření (vzorky).

Graf podle vzorků (PIN by Parts) znázorňuje současně měření všech vzorků (oblastí) všemi operátory. Zachycuje neupravená data a zároveň i průměr těchto měření. Tento graf znázorňuje měření tří různých operátorů pro každý ze tří vzorků. Sledovány jsou v tom případě rozdíly mezi nejvyšším a nejnižším naměřeným bodem jednotlivých vzorků. Pokud jsou si příliš vzdáleny, může to napovídat, že vzorky nejsou skutečně reprezentativní k danému testu. Tuto situaci však nelze objektivně určit ze zjištěných dat. V každém z měřených úseků jsou jednotlivá měření, která se výrazně odchyľují od jejich zbytku. Můžeme tedy tvrdit, že takto změřená data jsou nejspíše chybou měření, nikoli reflektující nevhodnost měřených vzorků.

Graf podle operátora (PIN by Operator) seskupuje data podle toho, kdo je sesbíral (prováděl měření), čímž pomůže identifikovat problémy operátorů. Například nekonzistentnost měření, či špatná měřicí technika. Výrazný sklon mezi operátorem Martin a Eva naznačuje, že operátor Martin má tendenci měřit trochu méně než operátoři Eva a Katka.

Graf interakce mezi operátorem a vzorkem (Parts \* Operators Interaction) znázorňuje data každého operátora zahrnutého do studie. Je to nejlepší graf pro zachycení interakce mezi operátorem a vzorkem. To znamená zachycení rozdílu mezi tím, jak různí lidé měří různé vzorky. Jelikož se čáry spojující znázorněné průměry, všech třech měření, významně odchyľují a nemají známky rovnoběžnosti, můžeme tvrdit, že existuje vztah mezi operátorem provádějícím měření a měřeným vzorkem. Tato skutečnost není dobrá a musí být prověřena.



Obr. 31: Celkové hodnocení testu Gage R&R pro měření trny [17]

V celkovém zhodnocení na obrázku 31 si můžeme odpovědět na dvě základní otázky. Můžeme adekvátně posoudit výkon, či možnosti procesu? Rozlišíme dobré a špatné dílce? Jak se uvedlo výše, hodnoty variability v rozmezí 10-30% jsou stále ještě z pohledu procesu akceptovatelné, ale 30% a více je již neakceptovatelné a ohrožuje to vypovídající schopnosti měření, nebo procesu. Procentuální odpověď na první otázku, vyšla negativně. Z 80,6% nejsme schopni adekvátně posoudit výkon, či možnosti procesu. Tedy pouze 19,4% jsme schopni adekvátně posoudit tuto skutečnost. Procentuální výsledek druhé otázky vyšel opět negativně, a to 41%. Znamená to tedy, že máme pouze 59% šanci rozlišit dobrý rozměr od špatného, protože variace samotného měřicího systému je 41%.

Výsledky testu jsou však zkreslené skutečností, že díry se opakovaným měřením trnem opotřebovávaly, respektive zvětšovaly, viz tabulka 4. Výsledky testu z pohledu opakovatelnosti a reprodukovatelnosti tak jsou nevypovídající. Záměr a cíl s jakým byly trny pořízeny je však úspěšně splněn. Nové sady kontrolních trnů by měly zamezit možnosti záměny kontrolního měřidla a aktivně tomu předcházet.



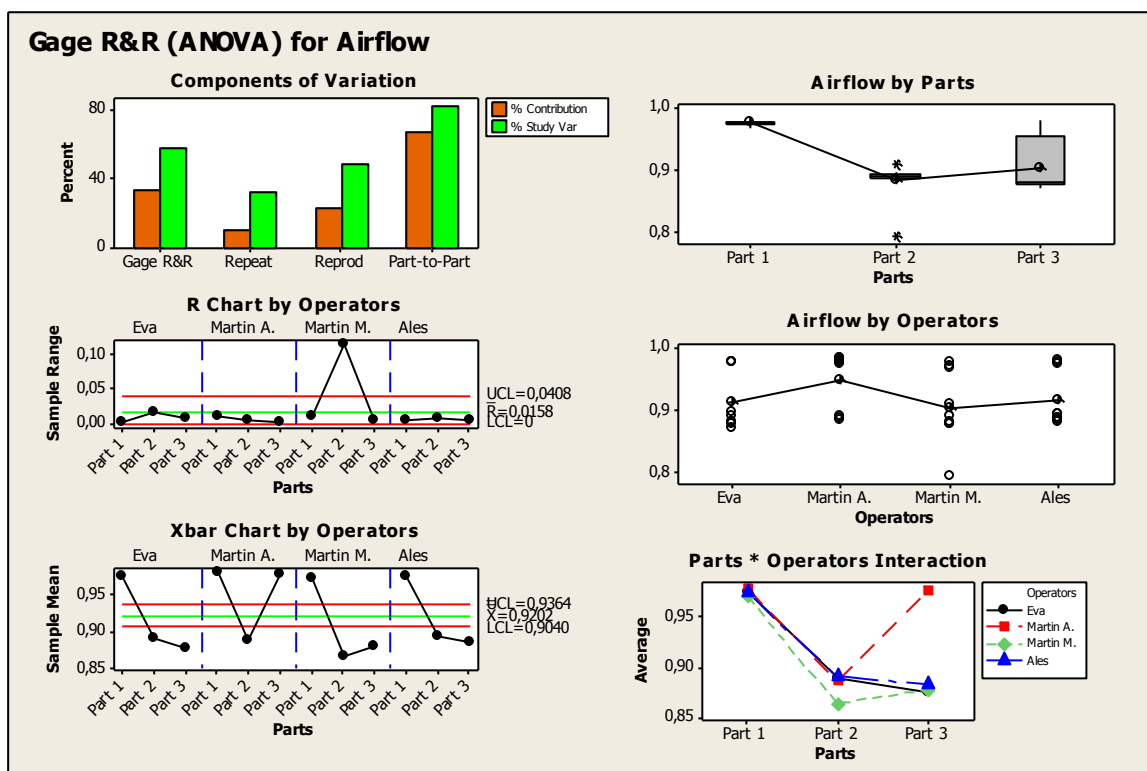
Tab. 4: Průměrné zvětšení děr

Průměrné zvětšení děr v jednotlivých oblastech [mm]	
Oblast 1	+0,01
Oblast 2	+0,04
Oblast 3	+0,02

Jednotlivá průměrná zvětšení v každé oblasti sice nejsou řádově vysoká, ale vypovídající hodnota testu tím již byla negativně ovlivněna.

#### 5.4.4 Test opakovatelnosti systému měření efektivní průtočné plochy - Gage R&R

Test opakovatelnosti systému měření efektivní průtočné plochy na zařízení SF1020. Parametry testu byly definovány pro tři kusy dílců, čtyři operátory a tři opakování měření. Každé samostatné měření bylo definováno jako průměr hodnot z pěti měření.



Obr. 32: Gage R&R pro operaci měření průtoku vzduchu [17]

Obrázek 32 zobrazuje soubor šesti diagramů testu Gage R&R pro operaci měření průtoku vzduchu - Příspěvky variability (Components of Variation), Graf rozpětí Gage R&R

regulačního diagramu, Reprodukovatelnost (Xbar Chart by Operators), Krabicový diagram (Airflow by Parts), Graf podle operátora (Airflow by Operator), Graf interakce mezi operátorem a vzorkem (Parts \* Operators Interaction).

Graf Příspěvky variability (Components of Variation) obsahuje 4 složky variace, které jsou rozděleny stejně jako u předešlé studie na 2 podskupiny a to procentuální příspěvek procesu (Contribution) oranžovou barvou a procentuálně vyjádřená variabilita studie (Study Var) zeleně. První složka variace Gage R&R s výsledek kolem 57% tedy ukazuje, že měřicí systém není předvídatelný. Opakovatelnost, vyhodnocená z měření jednoho operátora měřicího stejný dílec opakovaně vyšla 55,8% a podílí se 32,2% na celkové variaci procesu. Reprodukovatelnost měření stejného dílce různými operátory vyšla 83% a na celkové variaci se podílí 47,9%. Variabilita mezi měřenými dílci vyšla vyšší než variabilita měřicího systému.

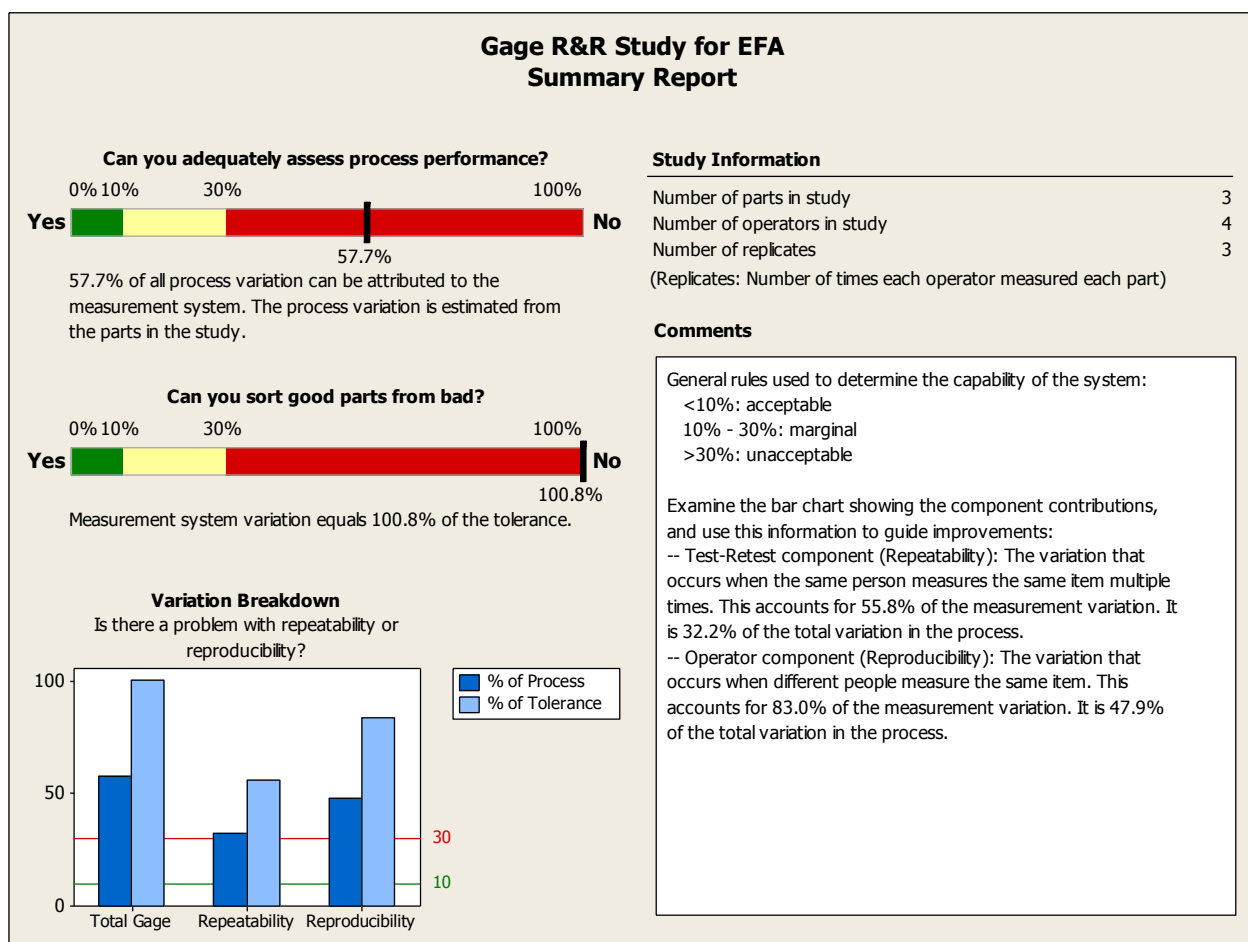
Graf rozpětí Gage R&R regulačního diagramu (R Chart by Operators) znázorňuje variabilitu měření u každého operátora a každého měřeného dílce. Operátor Martin M. udělal při měření druhého dílce chybu a jeho hodnota je výrazně mimo hranici horního kontrolního limitu.

Reprodukovatelnost (Xbar Chart by Operators) Výsledky měření všech čtyř operátorů jsou mimo horním a dolním kontrolním limitem, což je u tohoto nástroje správně, i když operátor Martin M. nejspíš udělal chybu měření. Naznačuje to tedy, že variabilita měřidla je mnohem menší, než variabilita mezi jednotlivými dílci.

Krabicový diagram (Airflow by Parts) znázorňuje současně měření všech kusů všemi operátory. Zachycuje neupravená data a zároveň i průměr těchto měření. Diagram znázorňuje měření všech čtyř operátorů pro každý ze tří vzorků. Dílec číslo tři vykazuje větší rozptyl než zbývající dva dílce. Nedá se však tvrdit, že tento kus (dílec) není pro měření reprezentativní. Výsledek je ovlivněn chybou operátora Martin M., jak je vidět v grafu rozpětí Gage R&R.

Graf podle operátora (Airflow by Operator) Výrazné navýšení křivky u operátora Martin M. potvrzuje, že naměřil vyšší hodnoty než ostatní operátoři. To je již patrné z grafu Reprodukovatelnosti.

U grafu interakce mezi operátorem a vzorkem (Parts \* Operators Interaction) se křivky ve dvou případech odchylují a nemají známky rovnoběžnosti, můžeme tedy tvrdit, že je vztah mezi operátorem Martin M. a kusem č. 2, a operátorem Martin A. a kusem č. 3.



Obr. 33: Výsledek testu Gage R&R pro operaci měření průtoku vzduchu [17]

Můžeme adekvátně posoudit výkon, či možnosti procesu? Nemůžeme. Výsledek vyšel negativně s 57,7%. Rozlišíme dobré a špatné dílce? Nerozlišíme. Výsledek s hodnotou 100,8% se neočekával. Výsledek testu nejspíše ovlivnily chyby v měření, které se však při měření mohou vyskytnout. Nejvíce asi měření kusu č. 3 operátorem Martin A., který naměřil výrazně vyšší hodnotu, než ostatní operátoři.

#### 5.4.5 Významnost vlivů procesních faktorů při měření efektivní průtočné plochy – Plánovaný experiment (DOE)

Plánovaný experiment je použit s cílem identifikovat faktory, které mají největší vliv na výstupní hodnotu naměřené efektivní průtočné plochy z procesu a dále určit významnost těchto vlivů.

Za tímto účel byl nadefinován plný faktoriální test s třemi faktory a různých úrovní (počtem podmnožin), viz tabulka 5.

Tab. 5: Plný faktoriální test

Faktory		
Stroj	Operátor	Směr proudění
Podmnožiny		
Stroj 1	Eva	Dovnitř (Intake)
Stroj 2	Martin A.	Ven (Exhaust)
Stroj 3	Martin M.	
	Aleš	

Variace testu DOE byla náhodně generována softwarem Minitab a pomocí tohoto softwaru byl také test vyhodnocen a zpracován.

## General Linear Model: Airflow versus Machine, Operator, Flow Mode

Factor	Type	Levels	Values
Machine	fixed	3	1, 2, 3
Operator	fixed	4	Eva, Martin A, Martin M, Ales
Flow Mode	fixed	2	Intake, Exhaust

Analysis of Variance for Airflow, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Machine	2	0.0002642	0.0002643	0.0001321	0.52	0.620
Operator	3	0.0009811	0.0009811	0.0003270	1.28	0.362
Flow Mode	1	0.0024200	0.0024200	0.0024200	9.51	0.022
Machine*Operator	6	0.0010277	0.0010277	0.0001713	0.67	0.679
Machine*Flow Mode	2	0.0001441	0.0001441	0.0000720	0.28	0.763
Operator*Flow Mode	3	0.0006071	0.0006071	0.0002024	0.80	0.540
Error	6	0.0015273	0.0015273	0.0002545		
Total	23	0.0069716				

S = 0.0159544    R-Sq = 78.09%    R-Sq(adj) = 16.02%

Obr. 34: Výsledek plánovaného experimentu procesu měření průtoku vzduchu [17]

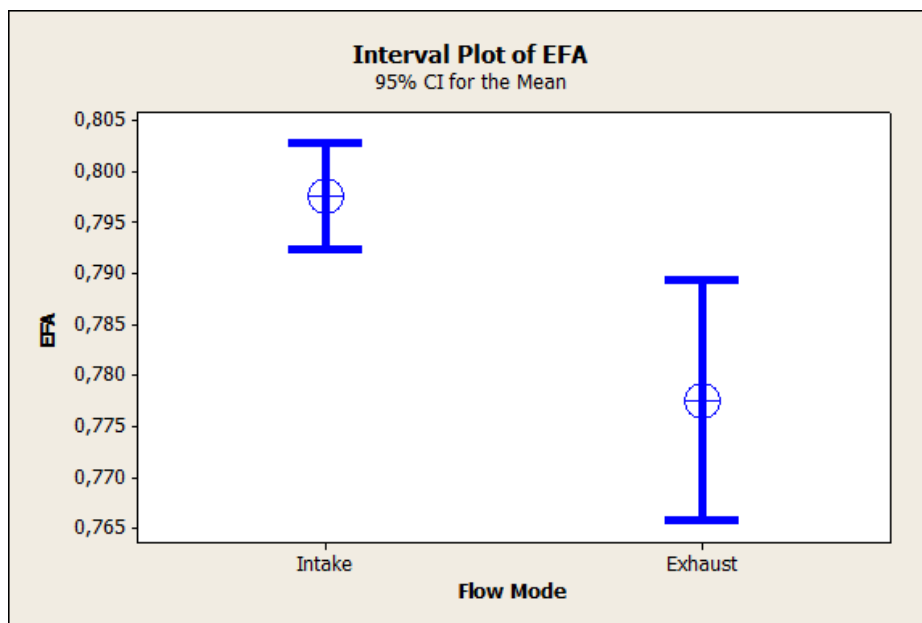
Test provedl vyhodnocení variací mezi jednotlivými faktory stroj, operátor a směr proudění, a dále provedl vyhodnocení variací mezi interakcemi faktorů stroj-operátor, stroj-směr proudění a operátor-směr proudění.

Výsledek testu lze určit z obrázku 34, kde dle sloupce F, který reprezentuje takzvaný F-poměr, neboli střední kvadrant (variace) mezi jednotlivými skupinami, děleno chybou středního kvadrantu ve skupinách.

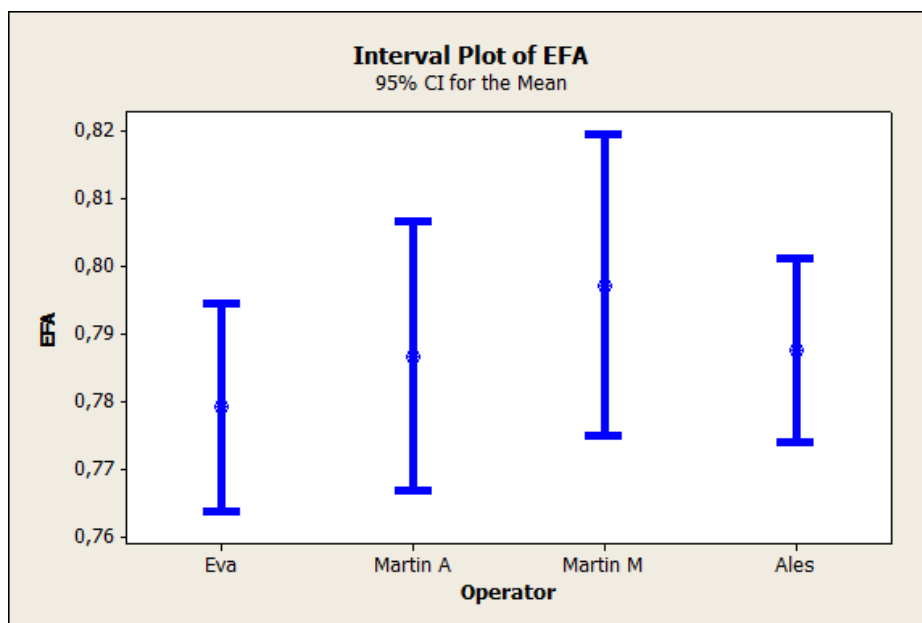
Na základě tohoto posudku lze z výsledku testu určit, že největšího F-poměru  $F = 9,51$  dosáhl samostatný režim proudění vzduchu (Flow Mode). Z principu testu tedy můžeme tvrdit, že režim proudění vzduchu je jediný faktor, který má významný účinek na variabilitu na 95% úrovni spolehlivosti.

### Detailní rozbor vlivu procesních faktorů na měření

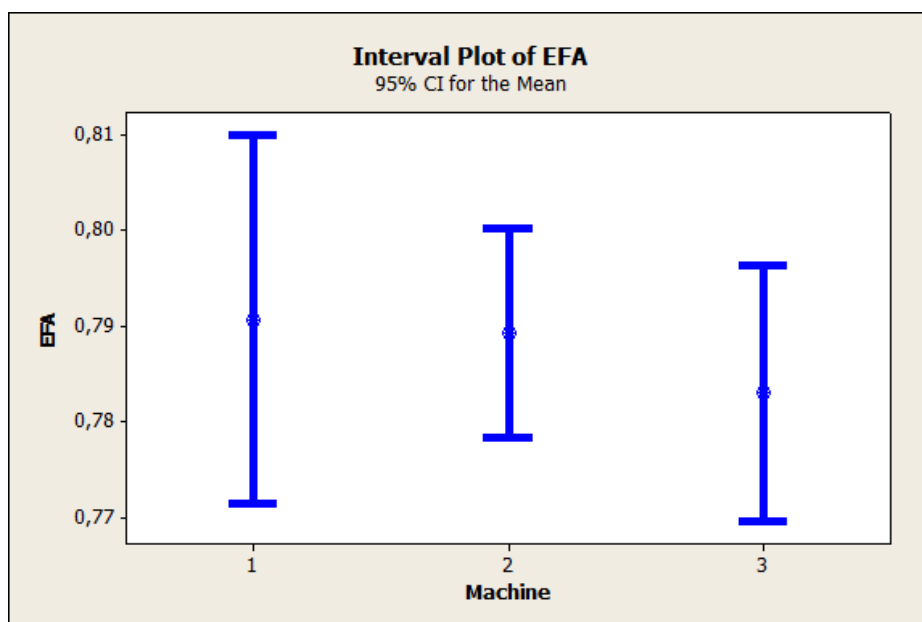
Z podrobných diagramů jednotlivého vlivu operátora (Obr.36), stroje (Obr.37) a nastavení směru proudění (Obr.35) je zřejmé, že operátor ani stroj nemají statisticky významný vliv na výslednou hodnotu. Naopak diagram směru proudění jednoznačně ukazuje výrazný vliv na výslednou hodnotu.



Obr. 35: Diagram vlivu směru proudění [17]



Obr. 36: Diagram vlivu operátora [17]



Obr. 37: Diagram vlivu stroje [17]

## 5.5 Řízení

Poslední fáze Řídit se zaměřuje na dokončení práce na projektu a odevzdání zlepšeného procesu jeho vlastníkovi pomocí určení způsobilosti procesu a vytvoření plánu na udržitelné řízení procesu.

### 5.5.1 Statistická regulace procesu výroby efúzních otvorů

SPC (Statistical Process Control) je zkratkou statistické regulace procesu. Regulace obsahuje opatření, které se provede v případě, že kontrola nevychází. Kontrola je pasivní pozorování procesu, zatím co regulace je aktivní ovlivňování procesu.

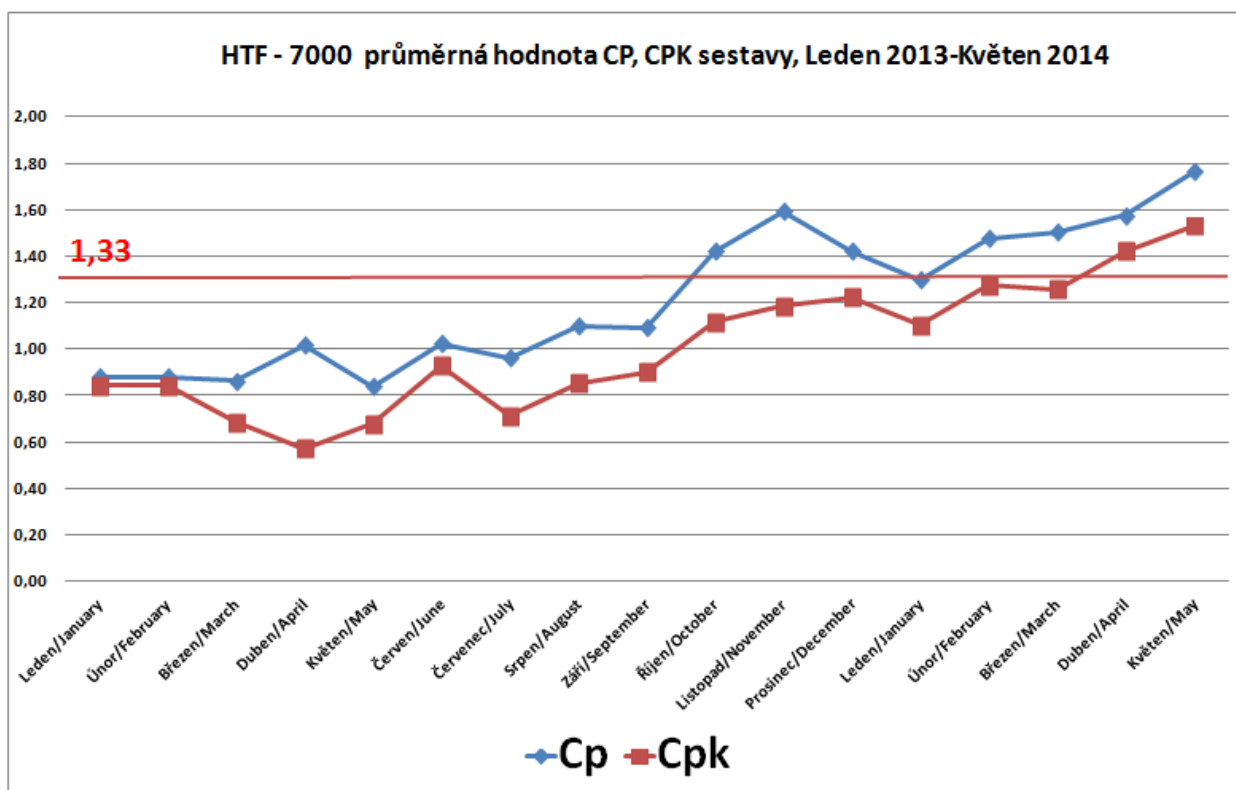
Jeden z cílů projektu je předpověditelný proces nominálního (finálního) měření průtoku vzduchu na detailech plamence sestavy programu HTF7000, který je reprezentován zvýšením indexů způsobilosti procesu  $C_p$ ,  $C_{pk}$  s cílem 1,33.

Tohoto cíle bylo dosaženo, nejen jako průměrné hodnoty celé sestavy, ale i na jednotlivých podskupinách, viz tabulka 6.

Tab. 6: Dosažené cíle indexů způsobilosti

	Hodnoty $C_p$ , $C_{pk}$ před zahájením projektu (Leden 2013)		Aktuální stav (Květen 2014)		Cíl	
	$C_p$	$C_{pk}$	$C_p$	$C_{pk}$	$C_p$	$C_{pk}$
<b>Sestava HTF-7000</b>	0,88	0,84	1,76	1,53	1.33	1.33
<b>Vnitřní panel</b>	1,04	0,97	1,41	1,33	1.33	1.33
<b>Vnější panel</b>	0,79	0,97	1,62	1,32	1.33	1.33
<b>Dóm</b>	0,8	0,6	2,26	1,94	1.33	1.33

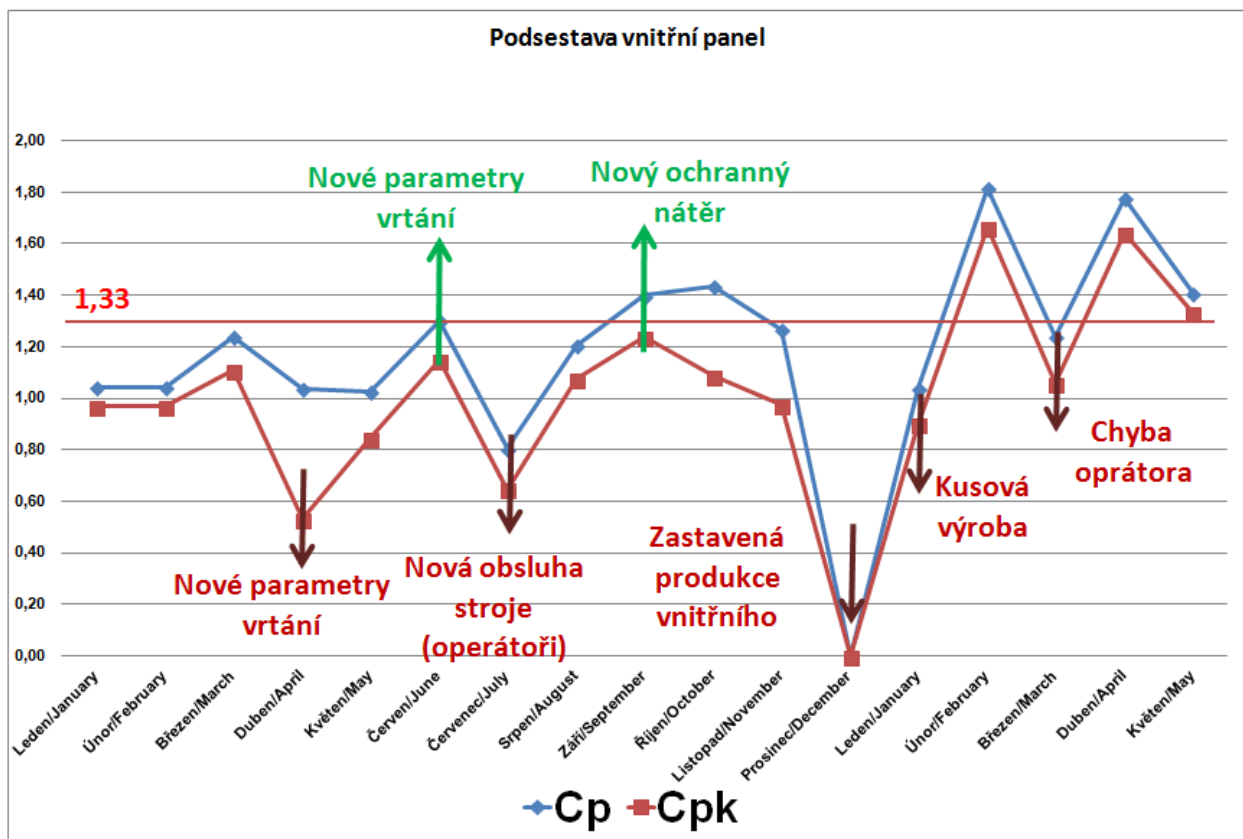
Celkový výsledek průměrné hodnoty sestavy je  $C_p = 1,76$  a  $C_{pk} = 1,53$ , viz obrázek 38.



Obr. 38: Celkový výsledek a vývoj průměrné hodnoty indexů způsobilosti sestavy

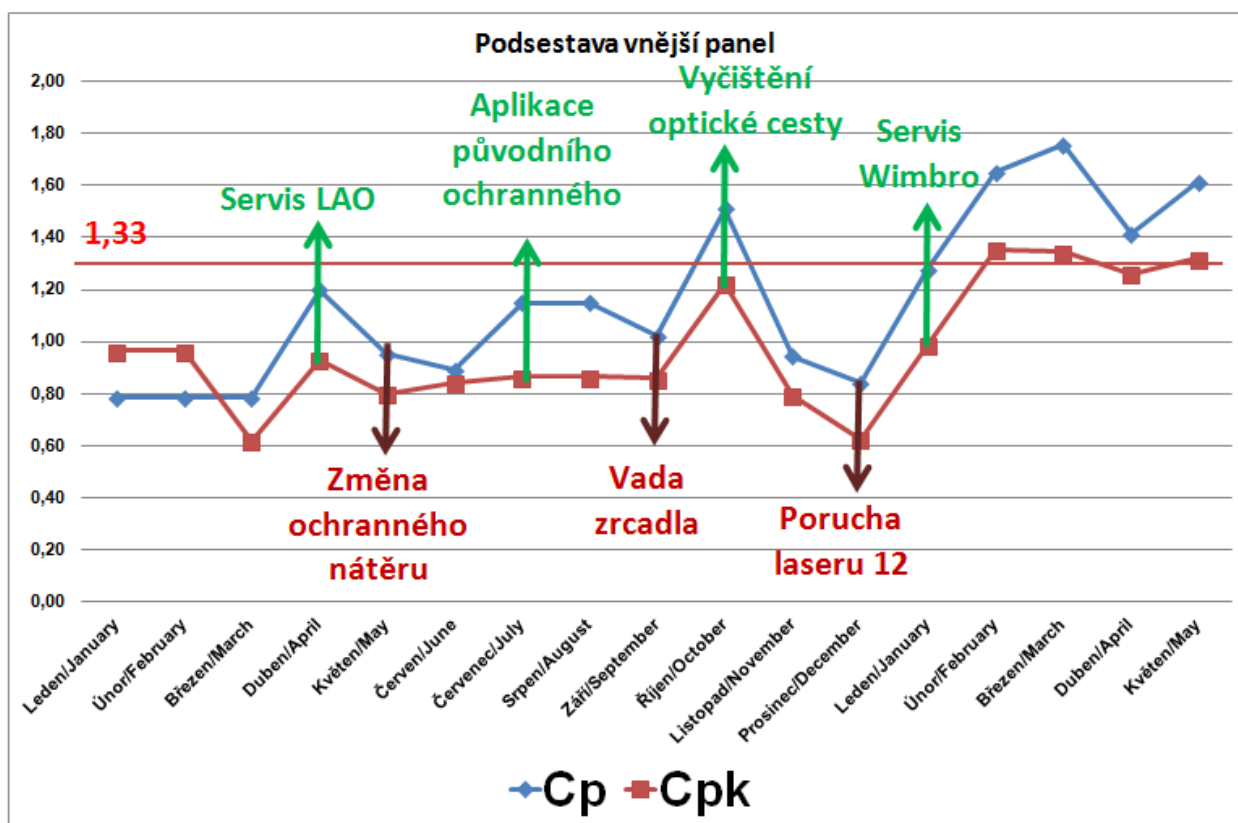
Výrobní proces efúzních otvorů na vnitřním panelu sestavy dosáhl výsledku  $C_p = 1,41$  a  $C_{pk} = 1,33$ , viz obrázek 39. Vývoj procesu z pohledu statistické regulace doprovázelo několik regulačních zásahů. Pozitivní regulační zásahy, ty které procesu pomohly, byly nové parametry vrtání laseru a aplikace nového ochranného nátěru. Jako neúspěšný regulační zásah můžeme označit nevhodné nové parametry vrtání laseru. Dále se do procesu projevilo několik významných vlivů, které vedly ke zhoršení úrovně stability procesu. Nejvýznamnější z těchto vlivů je samozřejmě zastavené produkce, ale výrazně se podílí i nahrazení dávkové výroby kusovou, chyba operátora a vliv nových operátorů laseru.





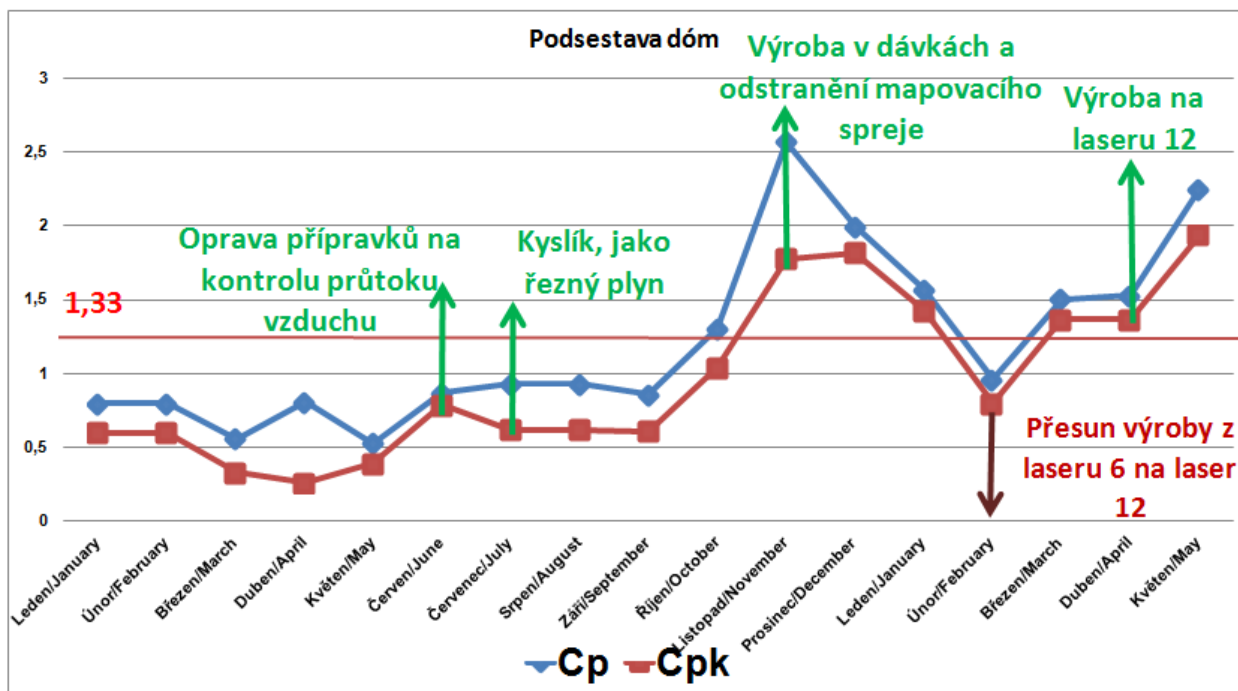
Obr. 39: Vývoj indexů způsobilosti na vnitřním panelu sestavy

Proces výroby vnějšího panelu má index způsobilosti a kritický index způsobilosti na úrovni  $C_p = 1,62$  a  $C_{pk} = 1,32$ , viz obrázek 40. Do tohoto procesu byly zavedeny regulační kroky v podobě servisu firmou LAO, která se specializuje na optické cesty, aplikace původního ochranného nátěru, vyčištění optické cesty a servis laseru společností Wimbro, která je výrobcem stroje. Jako negativní regulace se projevila změna nátěru. Dále se projevily negativní vlivy na proces, jako vada zrcadla optické cesty laseru a samotná porucha laseru.



Obr. 40: Vývoj indexů způsobilosti na vnějším panelu sestavy

Výsledek indexů způsobilosti statistické regulace dómu sestavy je s hodnotou  $C_p = 2,26$  a  $C_{pk} = 1,94$  nejlepším výsledkem ze všech podskupin, viz obrázek 41. Nemalou roli v tom hraje skutečnost, že dóm sestavy je z pohledu vyrobiteľnosti nejjednodušší. Pozitivní regulační zásahy do procesu jsou Oprava přípravků na kontrolu průtočné plochy vzduchu, aplikace kyslíku jako pomocného řezného plynu, zavedení výroby v dávkách, 100% odstranění mapovacího spreje z povrchu dílce a zavedení výroby dílce na laseru 12. Proces byl nejvíce ovlivněn přesunem výroby z laseru 6 na laser 12.



Obr. 41: Vývoj indexů způsobilosti na dómu sestavy

### 5.5.2 Plán na udržitelné řízení procesu

Nástroj Control Plan (Plán řízení) obsahuje všechny kroky potřebné pro budoucí udržení aktuálního stavu a jeho pozvolný rozvoj.

Řízený prvek					Nástroj zjištění		Měření			Interpretace			Akce	
Popis	Jednotka	Cíl	Dolní hranice	Horní hranice	Metoda	Nástroj	Měřený prvek	Četnost	Velikost vzorku	Graf	Výsledek	Vyhodnocení	Doporučené akce	Vlastník
Paprsek laseru	rozložení a tvar	vystředěný a kruhový	NA	NA	spektrální analýza	kamera	zařízení laser	1/kus	1/prvek	-	Vyhovující	ANO / NE	Údržba zařízení energetického zdroje	HAO údržba
Výsledná EFA	Cp / CPk	≥ 1,33	< 1,33	NA	SPC	MS Excel	Airflow zařízení	1/kus	1/kus	ANO	index způsobilosti	ANO / NE	Definovat kořenovou příčinu náhodné variability	Oddělení kvality
Regulační diagramy	NA	Stabilní proces	HKL	DKL	SPC	Minitab	Airflow databáze	1/14 dní	100%	ANO	Data, hodnoty	Stabilní / Nestabilní	Definovat kořenovou příčinu náhodné	Oddělení kvality

Obr. 42: Control Plan

V řídicím plánu, obrázek 42, jsou uvedeny tři řízené prvky – paprsek laseru, výsledná hodnota EFA a regulační diagramy.

První jmenovaný, paprsek laseru, slouží k udržení výkonnostního standardu parametru laseru, který nejvíce ovlivňuje výslednou hodnotu průměru fúzního otvoru a celkovým vlivem i hodnotu efektivní průtočné plochy.

Další dva řízené prvky jsou výsledná hodnota EFA a regulační diagramy. Řízení výsledné hodnoty EFA pomocí SPC má za cíl odhalit kolísání výkonu procesu jako celku a

regulační diagramy naopak detailně sledovat vývoj jednotlivých měření s cílem analyzovat případné budoucí náhodné variability.

## 6 Závěr

Cílem diplomové práce byl předpověditelný proces nominálního (finálního) měření průtoku vzduchu na detailech plamence sestavy programu HTF700, který je reprezentován zvýšením indexu způsobilosti procesu cp a kritickým indexem způsobilosti procesu cpk s cílem 1,33. Tato hodnota reprezentuje proces ve stavu  $3\sigma$ . Dále eliminovat extrémní body (nenadálé události) a najít jejich kořenovou příčinu a navrhnout a vyvinout kontrolní plán pro minimalizování variace v průběhu měření průtoku vzduchu.

Vycházelo se ze stavu, kde měření průtoku vzduchu na sestavě plamence programu HTF7000 mělo dle SPC průměrnou hodnotu cp 0,55 a cpk 0,26. Měření průtoku vzduchu tedy nebyl předpověditelný ani stabilní proces. Tento stav způsoboval nejakost, která byla stanovena na \$49 000 pro rok 2013 a s očekávaným nárůstem výroby měla v roce 2014 dosáhnout hodnoty až \$57 000.

Jako metodologický přístup pro vypracování diplomové práce byl použit DAMIC, z filozofie a způsobu řízení kvality Six Sigma. Tento přístup rozdělil praktickou experimentální část diplomové práce do několika vzájemně provázaných částí.

V první části se definoval samotný obsah projektu, či diplomové práce. Co je opravdu jejím předmětem a na co se musíme nejvíce zaměřit. Výsledkem byly podsestavy plamence a výrobní proces od vrtání laserem po konečné měření efektivní průtočné plochy. V první části se i definovala základní otázka projektu: Můžeme vyrábět přesněji? Tato otázka pak dále sloužila jako ukazatel cíle a pomocí myšlenkové mapy jsme uspořádaly všechny nápady a dotazy do ucelené formy. Následně pomocí nástroje SIPOC se nám podařilo definovat co je předmětem projektu a jaké jsou jeho meze.

Následující část se zabývala důkladným porozuměním představeného procesu. Ze sledu operací se určily operace kritické pro kvalitu a na jejich základě se vytvořila procesní mapa. Procesní mapa obsahovala vymezenou část operací z jejich sledu a i ty operace, které již předem nebyly označeny jako kritické. U všech operací se určily vstupy a následně výstupy z dané operace, které sloužily dále jako vstupy pro následující operaci. V procesní mapě se vyznačily vstupy, které jsou rušivé, kritické, kontrolované a běžné. Následně se určilo, které operace přidávají produktu hodnotu, a které naopak ne.

Třetí část využívá vstupů a výstupů z procesní mapy a jejich rozdělení. Obzvláště vstupy označené jako kritické byly použity v diagramu rybí kost, kde spolu s dalšími stupy, rozdělenými podle 6M kategorií, vytvořily detailní rozbor jednotlivých operací. Analýza druhů a účinků vad následně jednotlivé vstupy analyzovala a určila, které jsou opravdovým rizikem pro daný proces.

V části projektu určené dle DMAIC ke zlepšení jednotlivých procesů se pomocí kontrolních grafů určila reální stabilita procesu. Analýza opakovatelnosti a reprodukovatelnosti naopak poukázala na vstupy do procesů, které na ně mají největší vliv. Jedním z testovaných procesů bylo měření efektivní průtočné plochy, kde negativní výsledek 57,7% označoval nemožnost adekvátně posoudit výkon, či možnost procesu. Dále se zjistila neschopnost procesu určit a hlavně rozeznat v extrémních případech dobré dílce od špatných. Na tuto skutečnost poukázal i plánovaný experiment, který určil samotnou významnost vlivů procesních faktorů při měření. V případě, že by operátor zaměnil při měření směr proudění vzduchu, není možnost správně určit výslednou hodnotu efektivní průtočné plochy a nejde ani rozeznat jestli je dílec dobrý, nebo špatný.

Jednotlivé podsestavy plamence prošli celou řadou dílčí i velkých procesních úprav a změn a výsledkem je zvýšení indexů způsobilosti a kritických indexů způsobilosti na všech třech podsestavách. V celkovém součtu průměrné hodnoty indexů způsobilosti sestavy je proces výroby a měření na úrovni  $C_p = 1,76$  a  $C_{pk} = 1,53$ . Graf na obrázku 38 ukazuje trend způsobilosti procesu, který díky kontrolnímu plánu a neustálé snaze o zlepšení přesahuje hodnotu 1,33 a i nadále roste.

## 7 Seznam použité literatury

- [1] TOŠENOVSKÝ, J.; NOSKIEVIČOVÁ D. *Statistické metody pro zlepšování jakosti*. Ostrava: Montanex, 2000, 362s. ISBN 80-7225-040-X.
- [2] FABIAN F. *Statistické metody řízení jakosti*. Praha: Česká společnost pro jakost, 2007, 390s. ISBN 978-80-02-01897-1.
- [3] NOVÁK, J. *Organizace a řízení*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2006. 105 s. ISBN 80-248-1223-1.
- [4] NOVÁK, J. *Racionalizace výroby*. Ostrava: FS, Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava, 2007. Cit. 5.5.2014 dostupné z <http://www.fs.vsb.cz/europrojekty/414/racionalizace-vyroby.pdf>
- [5] MICHAEL, L.G.; ROWLANDS, D.; PRICE, M.; MAXEY, J. *The Lean Six Sigma Pocket Toolbook*. Brno: Vera Color, 2010. 280s. ISBN 978-80-904099-2-7
- [6] TOPFER A. *Six Sigma: Koncepce a příklady řízení bez chyb*. Brno: Computer Press, 2008. 508s. ISBN 978-80-251-1766-8
- [7] GREPL, Martin. *Obrábění laserem materiálů s proměnlivou tloušťkou*. Ostrava, 2010. Diplomová práce. VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže.
- [8] GAVRILOV, P.; JELINKOVA, H.; VRBOVA, M. *Úvod do laserové techniky*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1994. 235 s. Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská. ISBN 80-01-01108-9.
- [9] SADILEK, M. *Nekonvenční metody obrábění I*. 1. vyd. Ostrava: Ediční středisko VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. 152 s. ISBN 978-80-248-2107-8.
- [10] MIČIETOVA, A.; MAŇKOVA, I.; VELIŠEK, K. *Top trendy v obrábění V: Fyzikálne technológie obrábania*. Žilina: Media/ST s.r.o., 2007. 232 s. ISBN 8096895472.
- [11] PLURA, J. *Plánování jakosti II*. Ostrava: 2012. 172s. ISBN 978-80-248-2588-5

[12] CARTER, M. *Air Flow Testing for Gas Turbine Components*. 2013. Cit. 7.5.2014 dostupné z

< [http://www.fsi.com/taining/public/air\\_flow\\_testing\\_for\\_gas\\_turbine\\_components.pdf](http://www.fsi.com/taining/public/air_flow_testing_for_gas_turbine_components.pdf) >

[13] *Testing needs change for Six Sigma Process*. www stránka. Cit. 7.5.2014 dostupné z

< [http://www.qualitymag.com/common/print\\_aticle.asp](http://www.qualitymag.com/common/print_aticle.asp) >

[14] GENERAL ELECTRIC COMPANY. *Multi-hole film cooled combustor linear with differential cooling*. Původce vynálezu: Elias H. LAMPES. US 07/695,488. USA. Patentový spis US5241827 A. Publikováno 7.9.1993 dostupné z

< <http://www.google.com/patents/US5241827> >

[15] HONEYWELL INTERNATIONAL INC. *Combustor systems with liners having improved cooling hole patterns*. Původce vynálezu: Rodolphe DUDEBOUT, Paul R. YANKOWICH, Frank J. ZUPANC, Ronald B. PARDINGTON. US 11/863,791. USA. Patentový spis US7905094 B2. Publikováno 28.9.2007 dostupné z

< <http://www.google.com/patents/US7905094> >

[16] KOCÁB, J.; ADAMEC, J. *Letadlové motory*. 2.vyd. Corona 2008. 175s. ISBN 978-80-86116-54-9

[17] *Minitab 16*. Software. LEAD TECHNOLOGIES, INC., 2010.



## 8 Seznam příloh

EFA DOE test	AND142 – 01
EFA GAGE R&R test	AND142 – 02
PIN GAGE R&R test	AND142 – 03
CD nosič	AND142 – 04